

**INFORME
PROYECTO CASCADA**

**Efecto de los árboles de sombra sobre el rendimiento de
los cafetos, basado en perfiles de daño**



Fomentado por el:



Ministerio Federal
de Medio Ambiente, Protección de la Naturaleza,
Obras Públicas y Seguridad Nuclear

en virtud de una resolución del
Parlamento de la República Federal de Alemania

Elaborado por:
Rogelio Villarreyna Acuña
Revisado por:
Rolando Cerda B.
Jacques Avelino

14 de octubre 2016

Tabla de contenido

1.	Introducción	1
2.	Rendimientos de café en los países centroamericanos	2
3.	Principales factores que afectan el rendimiento del café.....	2
3.1.	Manejo del cafetal.....	2
3.2.	Las condiciones del suelo	3
3.3.	La edad de los cafetos	4
3.4.	El clima	4
3.5.	Malas hierbas en el cafetal	4
3.6.	La bienalidad de la producción	4
3.7.	Densidad de plantación y variedad del cultivo	5
3.8.	Plagas y enfermedades.....	5
3.9.	La cobertura de sombra y su efecto sobre el rendimiento	6
4.	Efecto de la sombra sobre factores que afectan el rendimiento.....	8
4.1.	Efecto de la sombra sobre la fertilidad del suelo y su repercusión sobre el rendimiento del café	8
4.2.	Efecto de la sombra sobre el control de malas hierbas y su repercusión sobre el rendimiento del café	9
4.3.	Efecto de la sombra sobre la bienalidad de la producción y su repercusión sobre el rendimiento del café ...	9
4.4.	Efecto de la sombra sobre la densidad de siembra y período de renovación de los cafetales y su repercusión sobre el rendimiento	10
4.5.	Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades y su repercusión sobre el rendimiento de los cafetos	10
5.	Pérdidas en rendimiento de los cafetos ocasionado por efecto de la sombra	11
6.	Importancia de los perfiles de daño para una mejor valoración de las pérdidas de rendimiento en el cultivo de café	12
6.1.	Tipología (agrupaciones) de plagas y enfermedades, según niveles de ataque	12
6.2.	Perfiles de daño por plagas y enfermedades y su relación con las pérdidas de rendimiento, la sombra y otros perfiles (topoclima, suelo, otras prácticas de cultivo)	13
6.3.	Estimación de las pérdidas de rendimiento en el café	15
7.	Importancia de la sombra para la regulación de plagas y enfermedades, como un servicio ecosistémico.	15
8.	Conclusiones	18
9.	Agradecimientos.....	18
10.	Literatura citada.....	19
11.	Anexos.....	23

1. Introducción

La variabilidad y cambio climático ya son una realidad en Centroamérica y el mundo, y sus efectos negativos están teniendo un impacto sobre el sector agrícola, con daños evidentes sobre la producción de bienes y servicios. Los eventos extremos son cada vez más frecuentes (fuertes lluvias, sequías, olas de calor, entre otros). En países como Nicaragua y otros de Centroamérica como, Honduras, El Salvador y Guatemala, se prevé, para el año 2030, un aumento en la temperatura media anual de 1.4°C en promedio (Bouroncle *et al.* 2014) y para el 2050, una disminución de la precipitación anual de 70 mm (Ovalle-Rivera *et al.* 2015), lo que afectará severamente a este sector vulnerable como lo es la agricultura, además, para el 2050 se ha predicho una disminución de la precipitación anual de 70 mm (de 1670 a 1600 mm) en la región mesoamericana, específicamente en las zonas productoras de café (Ovalle-Rivera *et al.* 2015), lo cual no parece muy relevante, pero igual puede afectar al sector agrícola. El aumento de la temperatura conllevaría a buscar altitudes mayores para el cultivo del café (de 400-2000 msnm pasaría a un rango de 800-2500 msnm), en este sentido, Nicaragua y El Salvador que no tienen altas montañas, serían los más afectados.

Así mismo, se prevé que estos cambios del clima tengan un impacto sobre los suelos de pequeñas fincas. Un impacto significativo del cambio climático para la producción de las pequeñas fincas es la pérdida de materia orgánica del suelo debido al calentamiento de éste. Temperaturas más altas del aire pueden acelerar la descomposición de materia orgánica e incrementar las tasas de otros procesos del suelo que afecten su fertilidad. Dado que la cobertura del suelo disminuye, con la descomposición más acelerada de la materia orgánica, la vulnerabilidad a la erosión por viento incrementa, especialmente si los vientos se intensifican, lo que puede ser mucho más problemático en terrenos de ladera (Rosenzweig y Hillel 1998). Este efecto del clima sobre el suelo, al igual que los problemas que acarrear las plagas y enfermedades, tendrá también un fuerte impacto sobre los rendimientos de los cultivos, incluyendo el café.

Ante esta realidad y considerando la importancia del rubro café para los ingresos de muchas familias campesinas, se hace cada vez más indispensable la búsqueda de prácticas de adaptación al cambio climático para este sistema productivo. La incorporación de árboles de sombra en los cafetales se presenta como una buena alternativa de adaptación y sostenibilidad de los sistemas cafetaleros, ya que ayudan a amortiguar los efectos de eventos climáticos extremos, y reducir los riesgos que enfrenta la caficultura del futuro. Esta argumentación hace parte de una lógica de fortalecer los servicios ecosistémicos en agro-ecosistemas a través de la agroforestería y sobre todo con sistemas diversificados, que permitan a la vez mejorar los beneficios económicos de las familias y proveer servicios ecosistémicos como aprovisionamiento, mantención de calidad de suelos, regulación hídrica, secuestro de carbono (Vignola *et al.* 2015). Entonces, conociendo la importancia de los cafetales sombreados ante los eventos climáticos, es importante conocer también el efecto de la sombra sobre la producción del café, específicamente sobre las pérdidas en rendimiento de los cafetos, considerando toda las vías o eslabones de la cadena de producción en finca, entre los cuales sobresalen: el efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades a través del microclima; el efecto de la sombra sobre el suelo, efecto de la sombra sobre la fisiología y fenología de los cafetos; hasta llegar a conocer el efecto de la sombra sobre los rendimientos, a como se presenta en el esquema de la figura 1. Como contribución a esas necesidades, nos dimos a la tarea de hacer una revisión de estudios que explican la relación entre los árboles de sombra y los rendimientos de los cafetos, con el fin de que sea puesto a disposición de técnicos y otros usuarios potenciales.



Figura 1. Esquema representativo de la relación entre la sombra y el rendimiento de los cafetos, partiendo de su efecto sobre el microclima, las plagas/enfermedades y el suelo.

2. Rendimientos de café en los países centroamericanos

Según informes de instituciones enfocadas en el desarrollo agrícola en los países centroamericanos¹, se reportan rendimientos en quintales oro por hectárea de: 25 (Costa Rica), 22.1 (Honduras), 21.6 (Guatemala), 16.8 (Nicaragua) y 15.7 (El Salvador). Los mejores rendimientos se reportan en Costa Rica, mientras los rendimientos más bajos se reportan en el Salvador y Nicaragua.

3. Principales factores que afectan el rendimiento del café

Existe un conjunto de factores que afectan los rendimientos del café, entre los que se mencionan, las afectaciones por plagas y enfermedades, malas hierbas, condiciones climáticas, suelos, la edad de los cafetales, la densidad de siembra utilizada, variedad de cultivo, bienalidad de la producción, cobertura de sombra (%), tal como se muestra en la figura 2. Todos estos factores a su vez pueden ser modificados por el manejo agronómico de los cafetos y por el manejo agroforestal de los doseles de sombra. En las subsecciones siguientes brindamos una breve explicación sobre cada uno de los aspectos anteriormente mencionados y su repercusión sobre el rendimiento de los cafetos.

3.1. Manejo del cafetal

En Nicaragua, por ejemplo, los bajos rendimientos han sido atribuidos en mayor escala a la falta de implementación de prácticas eficientes en el cultivo. En este caso se hace mucho énfasis a fertilizaciones inadecuadas (cantidades insuficientes), poco uso de insumos para el control de plagas y enfermedades, uso de productos poco eficientes, poco uso de podas y renovaciones, sobre todo por los pequeños productores. También sobresale el mal manejo de la sombra, sobre todo en Nicaragua donde el 96 % de los cafetales se cultivan bajo sombra. Se conoce que la sombra excesiva reduce el rendimiento del café.

¹ IHCAFE, Honduras; ICAFE, Costa Rica, ANACAFE, Guatemala, MAG, Nicaragua, MAG, El Salvador

Un exceso de sombra, aparte de reducir el rendimiento (directamente), también puede beneficiar ciertas plagas y patógenos, que pueden afectar también el rendimiento, aunque posiblemente puede desfavorecer otras plagas y enfermedades que se desarrollan mejor a pleno sol.



Figura 2. Factores que afectan el rendimiento del café, incluyendo la sombra (% de sombra). Adaptado de Arcila (2007a)

3.2. Las condiciones del suelo

Las condiciones de suelo también son importantes para los rendimientos del café. Los elementos minerales contenidos en el suelo, pueden permitir alto crecimiento de las plantas de café, pero también puede inducir a deficiencia de las hojas (estado nutricional), lo cual tendrá su repercusión directamente sobre el rendimiento (Clément 2015). En este sentido, para *Coffea arabica*, los suelos relacionados con mejores rendimientos deben tener las características siguientes: suelos de textura franco, estructura granular, suelos profundos o modernamente profundos, pendiente desde cero hasta 45 grados, suelos con buen drenaje (no inundables) y un pH entre 5.5 y 6.5 (Duicela 2011). Por lo tanto, un café plantado en suelos que reúnen estas características estará en condiciones de brindar mejores rendimientos, en comparación con un café plantado en suelos fuera de estas exigencias. Los elementos nutritivos que el cafeto requiere en mayor cantidad son: nitrógeno, fósforo y potasio, y en menores cantidades: calcio, magnesio, azufre, hierro, zinc, manganeso, boro y cobre. La carencia de alguno de estos nutrientes afecta el normal crecimiento, desarrollo y productividad de las plantas (Duicela 2011). Los suelos buenos para cultivar café deben tener contenidos de materia orgánica mayores al 5 %. Los suelos con coloración oscura están relacionados con un mayor contenido de materia orgánica (Wintgens 2004). El contenido de agua en el suelo, sobre todo en los primeros 30 cm, también es un factor indispensable en la producción. La retención de humedad por el suelo está en función de sus características de textura y estructura y representa la reserva de donde las plantas absorben las cantidades necesarias para sus ciclos energéticos y de los nutrientes (Jaramillo y Chaves 1999).

3.3. La edad de los cafetos

La edad de los cafetales tiene mucha importancia en el rendimiento. Los cafetos después de 15 a 20 años empiezan a reducir el rendimiento. En Centroamérica, el envejecimiento de los cafetales es uno de los principales problemas que están afectando la producción, ya que las plantaciones tienen en su mayoría entre 30 y 40 años. Por lo tanto, estas son plantas que ya cumplieron su objetivo de generar trabajo e ingresos y sus rendimientos empiezan a ser menores (Anzueto 2016, opinión personal)². Se considera que el cafeto alcanza sus valores máximos de crecimiento y productividad entre los 8 años de edad, lo que puede variar en dependencia de factores agroclimáticos de la zona (principalmente, suelo y clima). Después de este período, la planta se empieza a deteriorar paulatinamente y su productividad disminuye hasta niveles de poca productividad (Arcila 2007b).

3.4. El clima

El clima también puede afectar directamente el rendimiento. Por ejemplo, los fenómenos climáticos (tormentas, heladas, fuertes lluvias), causan daños a las plantas y caídas de frutos. Lluvias fuertes durante la cosecha pueden provocar una maduración rápida de la cosecha, los granos son fácilmente desprendidos, por lo tanto, si la lluvia es acompañada con vientos fuertes, puede provocar una fuerte caída de granos (Clément 2015). Cada región posee características que conducen a un comportamiento específico de la planta y determinan su productividad de acuerdo a la oferta (de la región) (Jaramillo 2005). El café se ve favorecido con una buena distribución de la lluvia, precipitaciones entre 1200 y 1800 mm y la existencia de un periodo seco corto. Las lluvias distribuidas durante todo el año son responsables de múltiples cortes y baja productividad, y la falta de un periodo seco puede también limitar el cultivo del café en regiones tropicales lluviosas y bajas. Por otro lado, un déficit hídrico mayor a 150 mm anuales también puede reducir el periodo productivo (Maestri y Santos-Barro 1981).

3.5. Malas hierbas en el cafetal

Las malas hierbas, al competir con los cafetos por nutrientes, agua y espacio, causan reducciones en el rendimiento (García *et al.* 2000). Estas plantas (malas hierbas), se caracterizan por vivir en hábitats muy variables y se adaptan mejor que el cultivo a condiciones climáticas adversas. García *et al.* 2000, observaron una reducción del rendimiento de hasta un 36 % en parcelas que pasaron todo el año cubiertas de malas hierbas, lo que puede variar en dependencia del tipo de malezas y su nivel de agresividad. Además, el periodo crítico de interferencia de malezas en el café coincidió con la fase de llenado de fruto.

3.6. La bienalidad de la producción

El desarrollo de la caficultura intensiva ha contribuido a forzar metabólicamente a la planta de café y producir y sostener abundantes cosechas, es decir, a movilizar asimilados y elementos nutritivos al fruto, provenientes principalmente del tejido foliar y leñoso. Como consecuencia inmediata a lo anterior se da una reducción en la capacidad de producción vegetativa, debilitando la planta y ocasionando años alternos, es decir, años de abundante cosecha, caídas en la capacidad de crecer y desarrollar biomasa,

² Francisco Anzueto, fue investigador de ANACAFE, Guatemala y actualmente asesor de empresas cafetaleras de Centroamérica.

comprometiendo fuertemente la cosecha del año siguiente. Ese efecto explicado anteriormente se conoce con el nombre de bienalidad de la producción, es decir, que a un año de alta producción le sigue un año de baja producción (Monge 1990), lo cual tiene un efecto directo sobre el rendimiento de los cafetales y los ingresos de las familias productoras. Ese comportamiento se da con mayor rigor en cafetales a plena exposición solar (DaMatta y Rodríguez 2007).

3.7. Densidad de plantación y variedad del cultivo

A medida que aumenta la población de plantas de café por unidad de área, disminuye la producción media por planta, debido a un incremento de la competencia por los recursos necesarios para el crecimiento (Arcila 2007a). Sin embargo, en términos de área, incrementar el número de plantas puede aumentar la producción total, cuando la población de plantas es lo suficientemente alta, para compensar la reducción ocasionada por cada planta de café de manera individual (Arcila 2007a). La respuesta del café a la densidad de siembra depende de varios factores como: la variedad, el desarrollo foliar, el sistema de cultivo (al sol o a la sombra), la localidad y la altitud (Arcila 2007a).

3.8. Plagas y enfermedades



Figura 3. Pérdidas de rendimiento en café, por afectaciones de plagas y enfermedades. Fuente: Avelino *et al.* (2015); Villarreyna (2014); Avelino y Rivas (2013); Wegbe *et al.* (2003); Gil *et al.* (2002); Barreda (2002); Oliveira *et al.* (2001); Avelino *et al.* (1995).

Las plagas y enfermedades son consideradas como el principal factor reductor del rendimiento. Estas (las plagas y enfermedades) pueden ser influenciadas por varios factores como: altitud, clima, sombra, manejo, las características de la planta de café, entre otros (Allinne *et al.* 2016). Las plagas y enfermedades a su vez, influyen en la defoliación, el número de ramas muertas, caída de frutos, daños directos al fruto, afectación de la calidad del grano, muerte total de la planta. Todo esto afecta negativamente el rendimiento en cantidad y calidad (Clément 2015). Entre los insectos plagas de mayor importancia en la región, en las últimas décadas se destacan: la broca del café (*Hypothenemus hampei*), el minador de la hoja (*Leucoptera coffeella*), la cochinilla (*Planococcus citri* y *linalinus*). Para el caso de las enfermedades se destacan: la roya del café (*Hemileia vastatrix*), el ojo de gallo del café (*Mycena*

citricolor), antracnosis del café (*Colletotrichum spp.*), mal de hilachas (*Corticium koleroga*), Mancha de hierro (*Cercospora coffeicola*), entre otras de menor importancia. Estas plagas y enfermedades han venido causando pérdidas considerables en las cosechas de café. Por ejemplo, para el caso de la roya, durante la epidemia del 2012 ocurrida en los países centroamericanos, se estimaron pérdidas desde un 3 % (Nicaragua), hasta un 31% (Honduras), con promedios de 16 % de pérdidas para toda Centroamérica, en comparación con el año anterior de cosecha (ciclo 2011-2012) (Avelino y Rivas 2013, Avelino *et al.* 2015). En zonas fuertemente afectadas en Nicaragua (epidemia 2012-2013), en las fincas que tuvieron más del 50 % de plantas fuertemente afectadas, se estimaron pérdidas de 4 qq/ha durante el año de la epidemia y pérdidas de 10.5 qq/ha (promedio) para el siguiente ciclo, según apreciación de los productores. Lo que significa pérdidas mayores al 50 %, tomando en cuenta los rendimientos nacionales (16 – 17 qq oro/ha) (Villarreyna 2014).

Para el caso del ojo de gallo, con ataques severos (porcentajes de infección del 50 %) se han estimado pérdidas primarias, es decir en el mismo año de la epidemia, de 1.3 kg de café cereza por planta (producción observada de 5.7 kg, de 6.9 esperados si la planta hubiese estado libre de la enfermedad), por afectaciones indirectas y directas en los frutos (provoca la caída de los frutos). Así mismo, la defoliación causada por la enfermedad induce una pérdida secundaria, es decir en la cosecha del año que sigue al de la epidemia, de 3.9 kg por planta (producción observada de 3.9 kg, de 7.8 esperados si la planta no hubiese sido afectada el año anterior). La pérdida total es de 35 % en los dos años (Avelino *et al.* 1995). Para mancha de hierro, en Brasil se han reportado pérdidas hasta de un 30 % (Oliveira *et al.* 2001). Mientras para antracnosis, en lugares donde ha habido fuertes ataques de la enfermedad, se han reportado pérdidas de hasta 80 % de la producción (Gil *et al.* 2002). Con respecto a la broca, Wegbe *et al.* (2003), en Togo, observaron pérdidas de producción, desde 1.20 a 6.72 %, con un nivel de ataque del insecto de 2.72 a 11 %, respectivamente (durante 2 años de estudio). Así mismo, Barreda (2002) menciona que con un 100 % de los frutos perforados, la broca puede causar pérdidas en el rendimiento de hasta un 30 a 35 %. El resto de plagas y enfermedades han ocasionado pérdidas en niveles menores en la región, al menos en las últimas décadas. En la figura 3 se pueden apreciar las principales plagas y enfermedades mencionadas y algunas perdidas de rendimiento que han sido estimadas.

3.9. La cobertura de sombra y su efecto sobre el rendimiento

Aunque el uso de árboles de sombra contribuye a la diversificación de los sistemas cafetaleros y mejorar la provisión de varios servicios ecosistémicos, también se conoce que pueden tener un efecto reductor en el rendimiento de los cafetos (Perfecto *et al.* 2005; Malézieux 2012) (ver figura 4). Al respecto, Estivariz (1997) encontró que la producción potencial de frutos por cafeto fue un 41% más baja en sombra (*Erythrina sp.*) con porcentaje de 40 a 60% de cobertura (1091 frutos por planta), que en sombra con porcentaje de cobertura menor al 20% (1838 frutos). Algo parecido encontró Siles *et al.* (2010), con reducciones del rendimiento bajo sombra (*Inga sp.*) de 38% en comparación con cafetales sin sombra. Esto puede explicarse por las presiones bióticas (plagas y enfermedades) (perfecto 2005) y la menor luminosidad que entra bajo el sistema con árboles (Rapidel *et al.* 2015). El número de nudos productivos depende en gran parte de la fotosíntesis. Dependiendo de las condiciones climáticas, la fotosíntesis de cultivos sombreados puede ser ligeramente inferior a los cultivos al pleno sol (Campanha *et al.* 2005; López-Bravo *et al.* 2012), lo que conduce a un número inferior de nudos fructíferos en condiciones sombreadas. Lo anterior es influenciado por un menor crecimiento de las bandolas antes de la floración (Rapidel *et al.* 2015). Así mismo, el número de granos por nudo productivo es generalmente menor bajo

sombra, lo que reduce inclusive, la amplitud de la bienalidad en el cafeto (Haggar *et al.* 2011). Baraër (2013) encontró mayor área basal de los cafetos y mayor contenido de nitrógeno en plantas de café a pleno sol, en comparación con cafetos bajo diferentes especies de sombra, lo cual a su vez fue bien relacionado con mejores rendimientos de los cafetos al pleno sol (ver anexo 1). Sin embargo, la sombra puede favorecer ciertas etapas en la elaboración de la producción. A pleno sol es mayor el número de flores que brotan, pero bajo sombra puede haber mayor cuaje debido a que se evita la quema directa por la luz solar (IICA 1998).

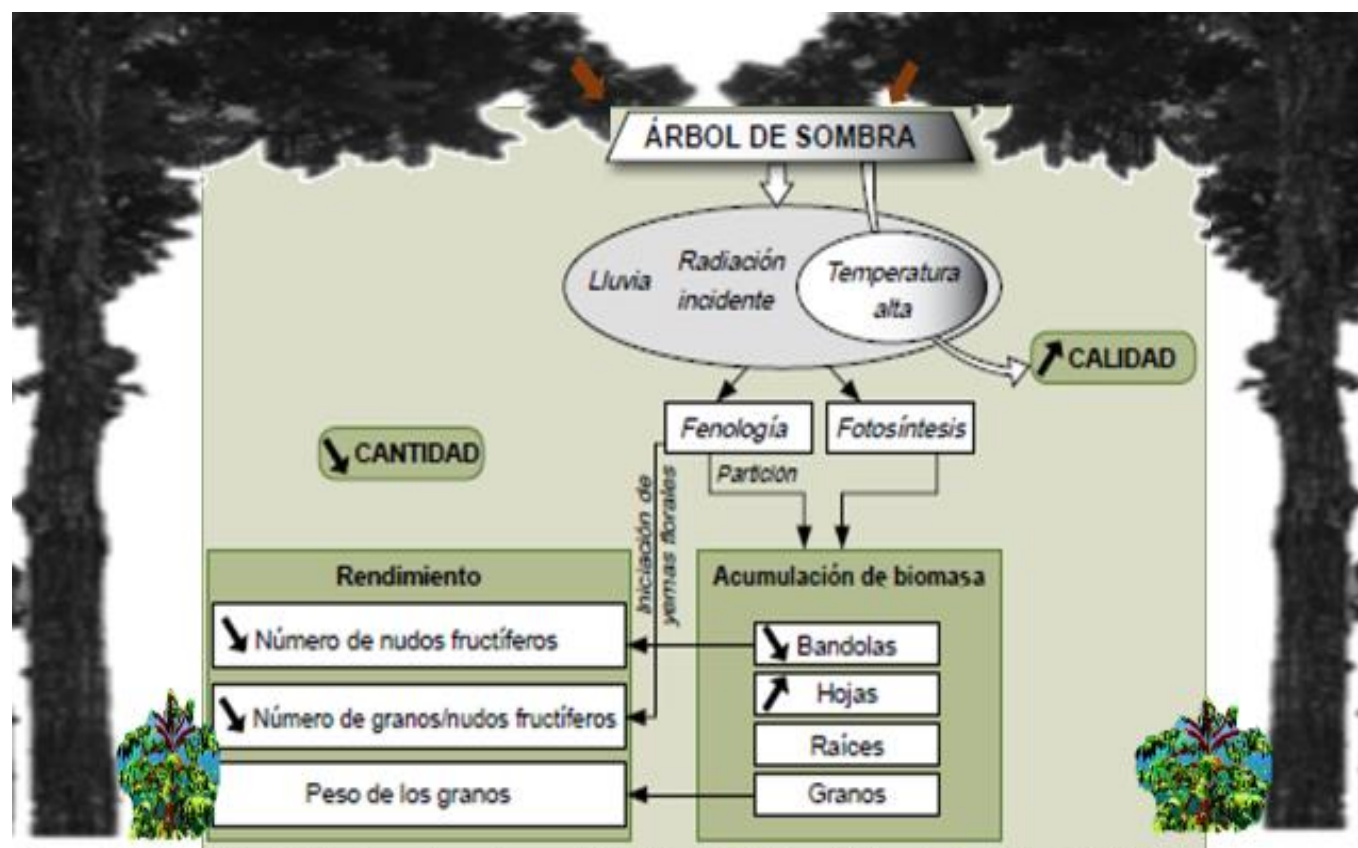


Figura 4. Efectos de los árboles de sombra sobre productividad y calidad de café. Fuente: Rapidel *et al.* (2015)

La reducción del rendimiento por la sombra, está en dependencia del porcentaje de sombra que se maneje en el cafetal. Al respecto, Soto-Pinto *et al.* (2000) observaron mejores rendimientos con cobertura de sombra entre 30 y 45 %. Porcentajes de sombra menores y mayores a este rango redujeron el rendimiento (ver anexo 2a), lo que también había sido observado anteriormente por Muschler (1997) (mejores rendimientos con 40% de cobertura). Por su parte Moraga Quezada *et al.* (2011), en un estudio realizado en Masatepe, Nicaragua, encontraron rendimientos similares bajo sombra (*Inga laurina* + *Samanea saman*) e inclusive en algunos casos mayores (con *Simaruba glauca* + *Tabebuia rosea*) que, a pleno sol, ambos sistemas bajo un manejo convencional intensivo (ver anexo 2b). Por último, en un estudio más reciente realizado por Cerda *et al.* (2015), se encontró también similitud de rendimientos en café a pleno sol y café cultivado en sistema agroforestal (sombra diversificada), ambos sistemas con alto manejo. Aunque se observó una leve tendencia a mayor rendimiento en el café a pleno sol, esta diferencia no fue estadísticamente significativa. Con un manejo bajo en ambos sistemas (sol y sombra), se observaron menores rendimientos en el café a pleno sol (ver anexo 3). Por lo tanto, de acuerdo a lo reportado por estos autores, se puede pensar que las diferencias de rendimiento entre un sistema con árboles de sombra

y pleno sol, depende mucho del manejo, es decir, si ambos sistemas (sombra y sol) se manejan con igual intensidad, los rendimientos pueden ser similares e inclusive podrían ser levemente mayores bajo sombra (30-40 %). También es importante recalcar el efecto de la sombra, de reducir la bienalidad de la producción, en comparación con cafetales sin árboles (DaMatta 2004), además de su menor dependencia de insumos externos (Herzog 1994).

Según López-Bravo *et al.* 2012, la reducción del rendimiento causado por la sombra puede reducir la incidencia de roya, debido a que reduce la susceptibilidad fisiológica del cafeto ante esta enfermedad. Por lo tanto, podemos pensar que los sistemas diversificados aparte de ser clave para los servicios ecosistémicos, también pueden ser una buena alternativa para conservar, e inclusive mejorar la productividad de los sistemas (Altieri 1999; Tschardtke *et al.* 2011; Ratnadass *et al.* 2012).

4. Efecto de la sombra sobre factores que afectan el rendimiento

La sombra, además de tener un efecto directo sobre el rendimiento de café (explicado en la subsección 3.9), también puede tener un efecto sobre cada uno de los factores mencionados en las subsecciones anteriores (fertilidad del suelo, plagas y enfermedades, malas hierbas, bienalidad de la producción, entre otros), que a su vez también afectan el rendimiento del café. Lo explicamos a continuación.

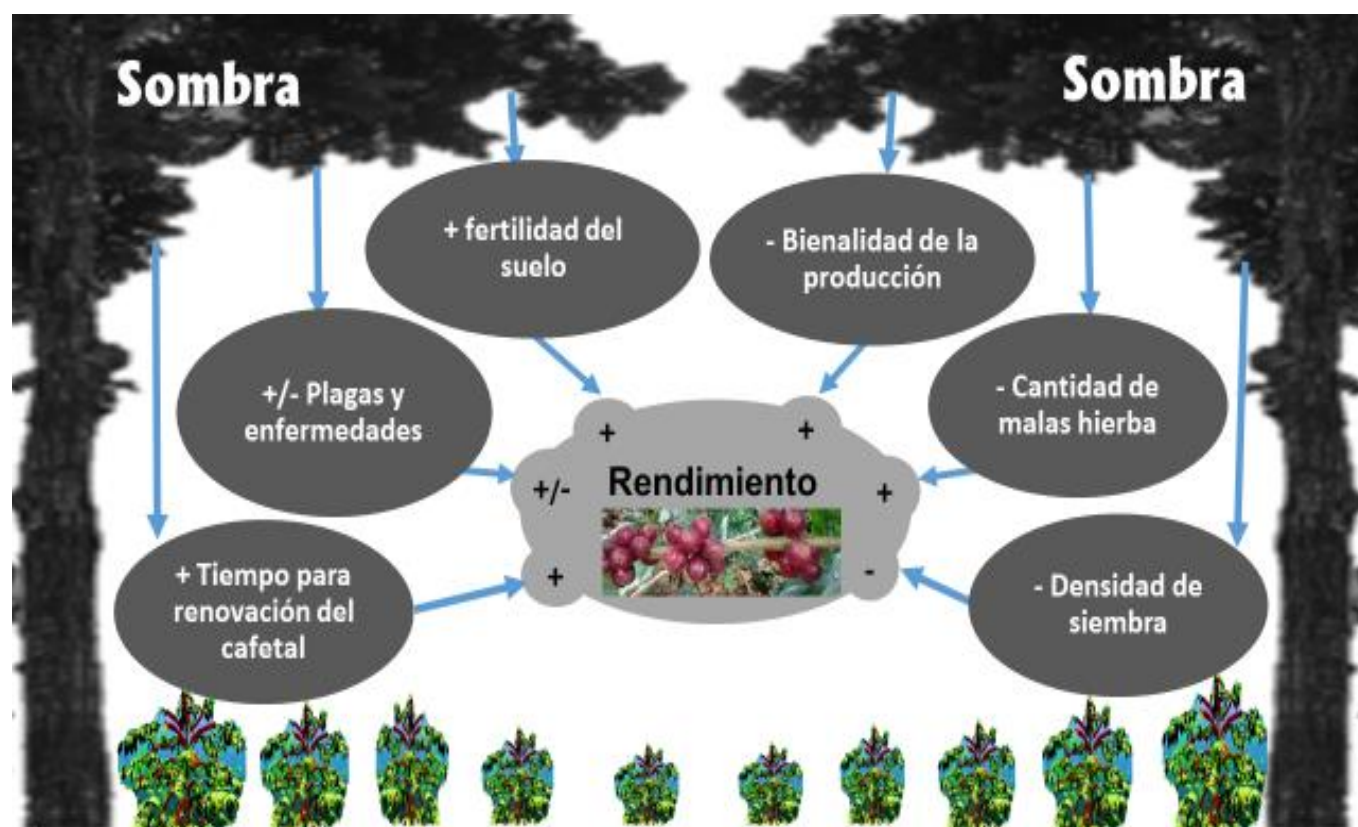


Figura 5. Efecto de la sombra sobre factores que afectan el rendimiento. Fuente: Cerda *et al.* (2015); Rapidel *et al.* (2015); Thériez (2015); Arcila (2007); DaMatta y Rodríguez (2007); Duque (2004); Mestre (1992); Monge (1990).

4.1. Efecto de la sombra sobre la fertilidad del suelo y su repercusión sobre el rendimiento del café

El contenido de materia orgánica en los suelos se ve favorecido por los árboles de sombra. Estudios realizados han demostrado que hay mayor cantidad de materia orgánica en cafetales con árboles (Thériez 2015; Muschler 1999) (ver anexo 5a y 5b). Así mismo, Cerda *et al.* (2015), en un estudio realizado con diferentes niveles y especies de sombra, encontraron que la mayoría de los elementos de la fertilidad del suelo fueron mejores bajo sombra diversificada, como el caso de menor acidez y buenos contenidos de potasio, dos indicadores claves de la calidad del suelo (ver anexo 5c). La sombra favorece el reciclaje de nutrientes, sobre todo los procesos de mineralización y nitrificación del nitrógeno, uno de los elementos fundamentales en los rendimientos del café (Baraër 2013). También es importante destacar que la sombra reduce la evaporación del agua del suelo (Lin 2010), debido a la intercepción de la luz solar y a la presencia del mantillo que protege el suelo (mantillo generado por los árboles) (Rapidel *et al.* 2015), lo cual también es beneficioso para los microorganismos que se encargan de la descomposición de la materia orgánica. Todos estos efectos de la sombra sobre el suelo, anteriormente explicados, tienen un efecto directo sobre los rendimientos, debido a que todos tienen que ver con la fertilidad del suelo y la fertilidad del suelo es uno de los elementos fundamentales en el rendimiento de los cultivos.

4.2. Efecto de la sombra sobre el control de malas hierbas y su repercusión sobre el rendimiento del café

La incidencia de malas hierbas (particularmente de gramíneas) puede ser manejada a través de la sombra y la hojarasca de los árboles asociados. Lo anterior fue demostrado por Thériez (2015), en un estudio realizado en café con diferentes niveles de sombra. En dicho estudio se encontró mayor cantidad de hojarasca y menos maleza en los sistemas con sombra diversificada y sombra simple (ver anexo 6). La hojarasca forma una barrera física encima del suelo que dificulta la germinación de semillas de malezas (Muschler 1999). La sombra por su efecto regulador de las malezas contribuye a reducir las fuentes de hospedero de *Mycena citricolor*, que le permiten al hongo sobrevivir sin la presencia de café (Granados 2015). Sin embargo, es importante destacar que algunas especies arbóreas utilizadas como sombra de cafetos, pueden servir también de hospederos para el hongo, lo que puede favorecer la afectación de ojo de gallo en el café, ante lo cual, es importante el manejo de la sombra (Granados 2015). Tomando en cuenta que las malas hierbas reducen el rendimiento de los cafetos por competencia, el efecto de la sombra sobre la reducción en cantidad y agresividad de estas (las malezas), tiene un efecto positivo sobre el rendimiento de los cafetos.

4.3. Efecto de la sombra sobre la bienalidad de la producción y su repercusión sobre el rendimiento del café

Los cafetales convencionales a pleno sol, son exigidos a producir altos rendimientos en un determinado año, y por lo tanto el año siguiente es de esperarse que en este tipo de cafetales haya una reducción del rendimiento, muy marcada (DaMatta *et al.* 2007), lo que puede explicarse principalmente por el aumento de la iniciación floral (DaMatta y Rodríguez 2007). La sombra reduce casi en su totalidad el efecto de bienalidad de la producción (DaMatta 2004; DaMatta *et al.* 2007; Rapidel *et al.* 2015), lo cual está relacionado con menor carga fructífera de las plantas de café bajo sombra y un mayor equilibrio, fruto-área foliar-madera-raíz (Monge 1990). El sombrero, al reducir la emisión de botones florales, regula las fluctuaciones bienales de la producción, evitando superproducciones y disminuyendo el agotamiento de la planta. Lo anterior permite rendimientos de grano satisfactorios por mucho más tiempo. En términos económicos, mayor número de cosechas podría perfectamente compensar, dentro de ciertos límites,

menores producciones medias por cosecha en aquellas regiones donde los cafetales a pleno sol producen más por cosecha que los cafetales arborizados (DaMatta 2004; DaMatta y Rodríguez 2007).

4.4. Efecto de la sombra sobre la densidad de siembra y período de renovación de los cafetales y su repercusión sobre el rendimiento

La respuesta del cafeto a la densidad de siembra depende, entre otros factores del sistema de cultivo, es decir, si es a pleno sol o cultivado bajo sombra (Arcila 2007a). Sin embargo, es importante tener claro que la sombra no afectará directamente la densidad de siembra del café. El número de plantas asociadas al café es el que influye en la densidad de siembra del café (Cerdea 2016, comunicación personal)³. En cafetales a plena exposición solar, bajo condiciones ambientales y manejo agronómico adecuado, y con variedad de porte bajo (Caturra), la densidad de siembra óptima puede soportar hasta 9,500 plantas por hectárea. Con variedades de porte alto (Borbón) bajo las mismas condiciones (a pleno sol), se puede soportar hasta un máximo de 6000 plantas por hectárea (Arcila 2007b). En cafetales con árboles de sombra, tomando en cuenta los acompañantes (70-100 árboles/ha), podría considerarse un máximo de 5,000 cafetos por hectárea para variedades de porte bajo y un máximo de 2,500 cafetos para variedades de porte alto. Según estas consideraciones se puede pensar que la sombra conduce a menores rendimientos, desde el punto de vista de la densidad de siembra. Sin embargo, hay que tener presente que la producción por planta es menor a mayores densidades de siembra. Por lo tanto, plantaciones con excesivas densidades de siembra al sol podrían ser menos productivas que plantaciones con adecuadas densidades de siembra bajo sombra. Además, es importante mencionar que a mayor densidad puede ser más corto el período necesario para intervenir con renovación (Duque 2004). Al respecto, Mestre (1992) citado por Arcila (2007b), observó que cafetos de la variedad borbón, obtuvieron el máximo promedio de renovación a la sexta cosecha, a plena exposición solar, mientras que en cafetales bajo sombra se registró a la quinta cosecha, ambos sistemas sembrados con igual densidad de siembra. Finalmente, en términos económicos, mayor densidad de plantas significa mayores costos (más fertilización, más inversión en manejo por cada cafeto, adicional a la densidad utilizada bajo sombra).

4.5. Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades y su repercusión sobre el rendimiento de los cafetos

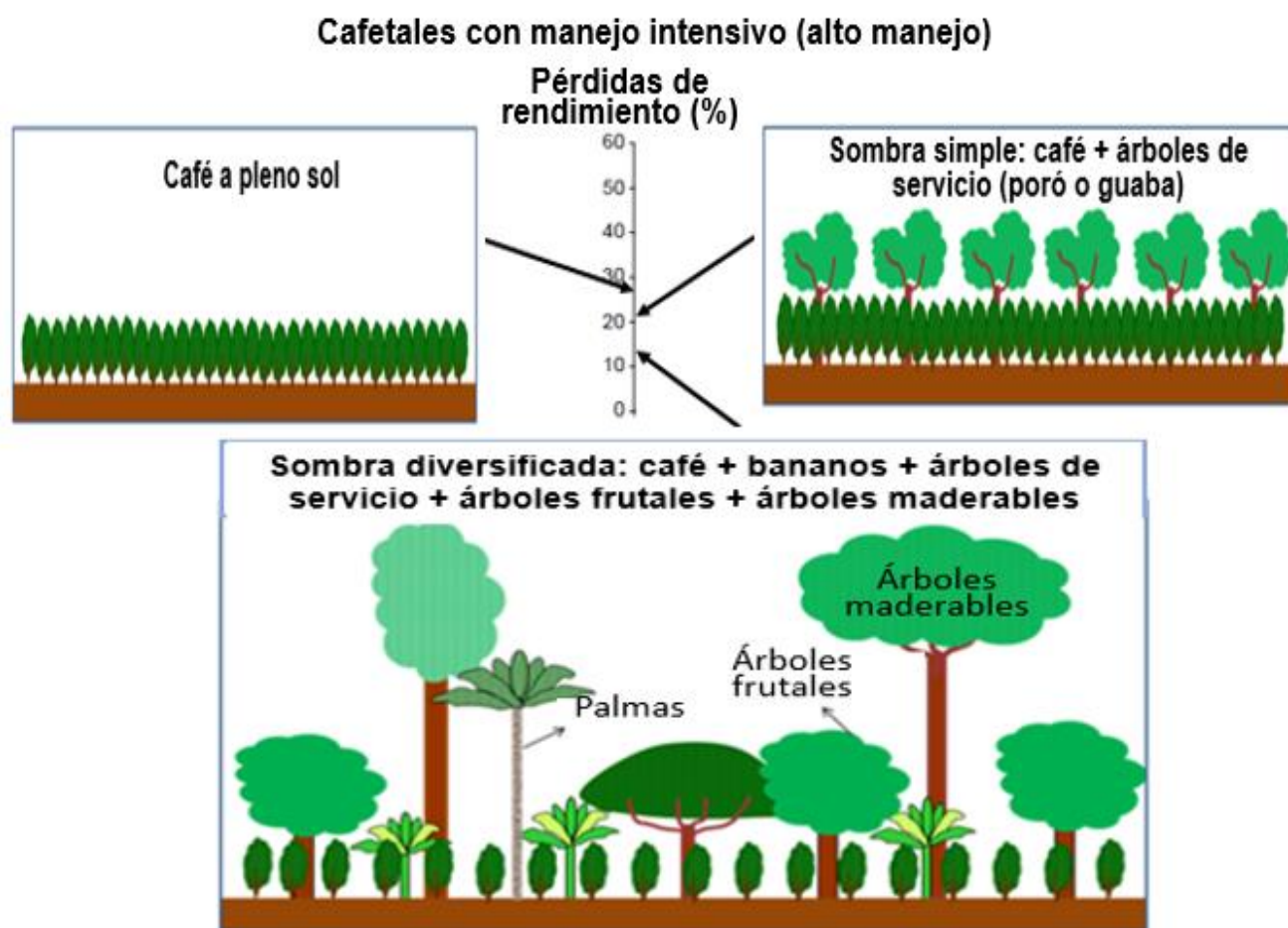
Los efectos de los árboles sobre las plagas y enfermedades son complejos y a veces contradictorios. Estos dependen de las especies consideradas (Rapidel *et al.* 2015). Sin embargo, según Cerda *et al.* (2015), la incidencia de plagas y enfermedades bajo los sistemas sombreados depende también mucho del manejo que se haga de todo el sistema. En este sentido un cafetal diversificado o con sombra simple, manejado de manera intensiva (podas de sombra, fertilización, manejo de plagas y enfermedades, podas de los cafetos), es decir, manejado con la misma intensidad que un sistema a pleno sol, puede inclusive presentar menos incidencia y severidad de plagas y enfermedades (roya del café y otras plagas y enfermedades), en comparación con un sistema a pleno sol, según lo observado por los autores. De la explicación anterior podemos deducir que las plagas y enfermedades en los sistemas sombreados no causarían mayores afectaciones en los rendimientos en comparación con el sistema a pleno sol, si ambos sistemas se manejan con igual intensidad. En la última sección (sección 6) de este reporte, hacemos una explicación más

³ Rolando Cerda Bistillo, especialista agroforestal CATIE

profunda al respecto: efecto de la sombra sobre la regulación de algunas plagas y enfermedades, como uno de los servicios ecosistémicos brindados por la sombra.

5. Pérdidas en rendimiento de los cafetos ocasionado por efecto de la sombra

Se han reportado situaciones donde la alta biodiversidad es asociada con daños mayores de plagas y enfermedades (Finke y Denno 2002), sobre todo en sistemas agroforestales (Avelino *et al.* 2012; López-Bravo *et al.* 2012, Ratnadass *et al.* 2012). Sin embargo, Cerda *et al.* (2015), encontraron en sistemas diversificados y sombra simple, manejados con igual intensidad que el sistema a pleno sol (alto manejo), menor porcentaje de roya, menor severidad de plagas y enfermedades, y menor muerte de ramas. Los sistemas diversificados trabajados con bajo manejo, presentaron mayor porcentaje de roya, mayor severidad de plagas y enfermedades, y mayor muerte de ramas, en comparación con un sistema a pleno sol, con manejo intensivo (ver anexo 4). Lo encontrado por estos autores sugiere que los cafetales con



El sistema con sombra diversificada bajo un manejo intensivo, puede generar menores pérdidas de rendimiento en comparación con los sistemas a pleno sol y sombra simple.

Figura 6. Efecto de los árboles de sombra sobre la pérdida de rendimiento en comparación con pleno sol, en cafetales con alto manejo. El porcentaje de pérdidas reflejado, es con base al rendimiento esperado o alcanzable y el rendimiento real obtenido. Fuente: Cerda *et al.* (2015). Figuras representativas de sistemas de café, cortesía de Clément (2015).

sombra diversificada y sombra simple, con buen manejo (manejo intensivo), pueden contribuir a la regulación de plagas y enfermedades, en vez de aumentarlas como normalmente se ha pensado, considerando una cobertura de sombra alrededor de un 30 %. Mayor a este porcentaje de sombra podría ser contraproducente (Cerdeira 2016, comunicación personal).

Durante la epidemia de roya del 2012, algunos productores por orientación de técnicos quitaron toda la sombra en parte del cafetal, con miras a reducir la severidad del ataque de la enfermedad, como resultado, en el área de café donde eliminaron toda la sombra, tuvieron pérdida mayor al 50% para el ciclo 2012-2013 y del 100%, para el ciclo 2013-2014 (debido a poda del 100 % de las plantas). Mientras en el área donde dejaron la sombra registraron pérdida del 20-25 %, sobre la producción total esperada, para los dos ciclos de cosecha (Villarreyna 2014). Esta observación por parte de los productores comprueba la importancia de la sombra ante ataques severos de enfermedades, en relación con las pérdidas de rendimiento, lo que también ha sido reportado por Avelino *et al.* (2015).

6. Importancia de los perfiles de daño para una mejor valoración de las pérdidas de rendimiento en el cultivo de café

Se han realizado estudios para estimar pérdidas en rendimiento de café causadas por plagas de manera individual. Por ejemplo: se han hecho estimaciones de pérdidas causadas por la roya durante un ataque severo, así mismo, se han estimado pérdidas causadas por broca durante fuertes ataques de la plaga. Pero poco se ha hecho para analizar las afectaciones o pérdidas de rendimiento causadas de manera conjunta por todas las plagas y enfermedades que afectan al café. Ante esta situación, Allinne *et al.* (2016) en un estudio realizado en sistemas agroforestales de Costa Rica, se enfocó en observar esta complejidad, a través del análisis de perfiles de daño por plagas y enfermedades (daños causados de manera conjunta por plagas y patógenos). En este estudio, se evidenciaron las interacciones y vínculos entre la biodiversidad, la producción del cultivo principal, el ambiente, el manejo y las plagas y enfermedades, con el fin de buscar recomendaciones económicamente viables y ecológicamente racionales para los agricultores (Cheatham *et al.* 2009). En el estudio de Allinne *et al.* (2016), la roya del café y la mancha de hierro tuvieron una incidencia de 25 % en promedio en las parcelas estudiadas, mientras que ojo de gallo y antracnosis (dieback), mostraron incidencias alrededor del 10 %. Otras plagas y enfermedades como, minador de la hoja, mal de hilachas, quema o derrite del café y *Ceratocytis canker*, se mantuvieron por debajo del 4 %. También se evaluó la abundancia de dos especies de nematodos, *Pratylenchus coffeae* Zimmermann (nematodo de la lesión de la raíz) y *Meloidogyne exigua* Eain (nematodo agallador de la raíz). En este sentido, *M. exigua* tuvo mayor incidencia (31,600 nemat/100g de suelo) versus 1,800 nemat/100g de suelo de *P. coffeae*. Los autores encontraron que los perfiles de daño y las pérdidas de rendimiento asociadas, dependen principalmente de las condiciones topoclimáticas⁴ y de suelo. Por lo tanto, las prácticas de cultivo (incluyendo manejo de la sombra) y manejo de plagas y enfermedades, deben definirse primero de acuerdo a las condiciones ambientales e inclusive condiciones de suelo.

6.1. Tipología (agrupaciones) de plagas y enfermedades, según niveles de ataque

En el estudio de Allinne *et al.* (2016) se logró identificar 4 perfiles de daño (4 tipologías). Para una mejor comprensión de cada perfil identificado se brinda a continuación una breve descripción en el cuadro 1:

⁴ Particularidad climática de un lugar reducido o unidad topográfica de escala local, que no coincide con el clima general de la región, y cuyas características se encuentran determinadas por la topografía. Es el clima resultante de la interrelación entre el clima y topografía.

Cuadro 1. Perfiles de daño según niveles de plagas y enfermedades

Plagas y enfermedades	Perfiles de daño (características de cada perfil con respecto a las plagas y enfermedades)			
	Perfil de daño 1 (IP1)	Perfil de daño 2 (IP2)	Perfil de daño 3 (IP3)	Perfil de daño 4 (IP4)
Roya del café	Mayor incidencia (39 %)	Cerca de la media global	Cerca de la media global	Menor incidencia (7,8 %)
Mancha de hierro	Mayor incidencia (29,8 %)	Menor incidencia (15,9 %)	Cerca de la media global	Cerca de la media global
Antracnosis	Mayor incidencia (26,6 %)	Cerca de la media global	Cerca de la media global	Menor incidencia (2,5 %)
Ojo de gallo	Cerca de la media global	Cerca de la media global	Menor incidencia (4,7 %)	Mayor incidencia (22,3 %)
Mal de hilachas	Mayor incidencia (13,6 %)	Cerca de la media global	Ausencia	Cerca de la media global
Quema o derrite	Menor incidencia (0,8 %)	Cerca de la media global	Cerca de la media global	Mayor incidencia (9,6 %)
<i>Ceratocytis canker</i>	Menor incidencia (0,1 %)	Cerca de la media global	Mayor incidencia (5 %)	Cerca de la media global
Minador de la hoja	Cerca de la media global	Menor incidencia (0,9 %)	Mayor incidencia (5,7 %)	Cerca de la media global
Nematodo <i>M. exigua</i>	Mayor población	Cerca de la media global	Cerca de la media global	Menor población
Nematodo <i>P. coffeae</i>	Menor población	Menor población	Cerca de la media global	Mayor población

Nota: las celdas coloreadas son las principales características que diferencian a cada perfil de daño

En el anexo 7 se puede apreciar mayor información de los perfiles de daño identificados.

6.2. Perfiles de daño por plagas y enfermedades y su relación con las pérdidas de rendimiento, la sombra y otros perfiles (topoclima, suelo, otras prácticas de cultivo)

El perfil 1 (IP1), el más severo, fue relacionado con bajo rendimiento alcanzable (el rendimiento esperado sin limitaciones, especialmente sin plagas ni enfermedades) y con altas pérdidas en rendimiento. Como se puede ver en la descripción de las tipologías de perfiles de daño (cuadro1), este agrupa las mayores incidencias de roya, mancha de hierro, dieback/antracnosis y mal de hilachas. Este perfil está asociado con mayores porcentajes de sombra que oscilan entre 16-65 %, en cafetales con sombra diversificada sin bananos (leguminosas y otros árboles sin banano), y sombra diversificada con bananos (Allinne *et al.* 2016) (ver anexo 8). Parte de estas asociaciones parece acorde a lo mencionado por Avelino *et al.* (2004); López-Bravo *et al.* (2012), quienes reportaron que la sombra densa crea condiciones de humedad y temperatura favorables para la roya del café (ver anexo 9). La sombra diversificada también fue relacionada con el IP2 que presentó menores niveles de daño que el IP, la mayoría de las enfermedades cerca de la media global (ver cuadro 1). Este perfil (IP2) fue relacionado, además, con plantas de café con los menores rendimientos, pero con pérdidas de rendimiento limitada. Por otro lado, el perfil IP4, con mayores incidencias de ojo de gallo, quema o derrite y nematodo de la lesión de la raíz (cuadro 1), fue relacionado con los cafetales a pleno sol. Este perfil también fue asociado con grandes pérdidas de

rendimiento, atribuido posiblemente a las enfermedades foliares y a los nematodos. Lo anteriormente explicado, no muestra un efecto claro de la sombra sobre los rendimientos, en relación a los perfiles de daño. La variación en los perfiles de daño podría interpretarse, además, en términos de cambios en las condiciones ambientales (topoclima que determina la temperatura específica, la humedad relativa, y la radiación solar) y características del suelo. Cerda *et al.* (2015) observaron un claro efecto de la sombra (sombra diversificada) sobre el suelo, en comparación con cafetales a pleno sol y sombra simple (una especie de sombra). En este sentido, la mayoría de los elementos de la fertilidad del suelo fueron mejores bajo sombra diversificada, como la acidez y el potasio, dos indicadores claves de la fertilidad del suelo.

El perfil de daño IP1, aunque tiene que ver mucho con la sombra y el manejo de la misma, también está bajo la influencia de otros aspectos, como es el topoclima y el suelo. Por lo tanto, no todas las pérdidas ocasionadas en los sistemas sombreados, son atribuibles a efectos de la sombra. Por el contrario, cuando las condiciones del suelo y topoclima son favorables para el desarrollo de plagas y enfermedades, la diversificación asociada al café podría aumentar la producción del sistema. Por otro lado, cuando las condiciones del suelo y topoclima son desfavorables para el desarrollo de plagas y enfermedades, la incorporación de árboles de sombra y la biodiversidad asociada al sistema, ofrece la posibilidad de mejorar los servicios ecosistémicos (secuestro de carbono, control biológico de plagas y enfermedades, fertilidad del suelo, entre otros) sin reducir la producción de café y con una contribución a la mejora de los beneficios familiares (Allinne *et al.* 2016; Cerda *et al.* 2015) (ver anexo 11). En la figura 7 se puede apreciar las interacciones de todos los elementos que pueden influir en la producción.

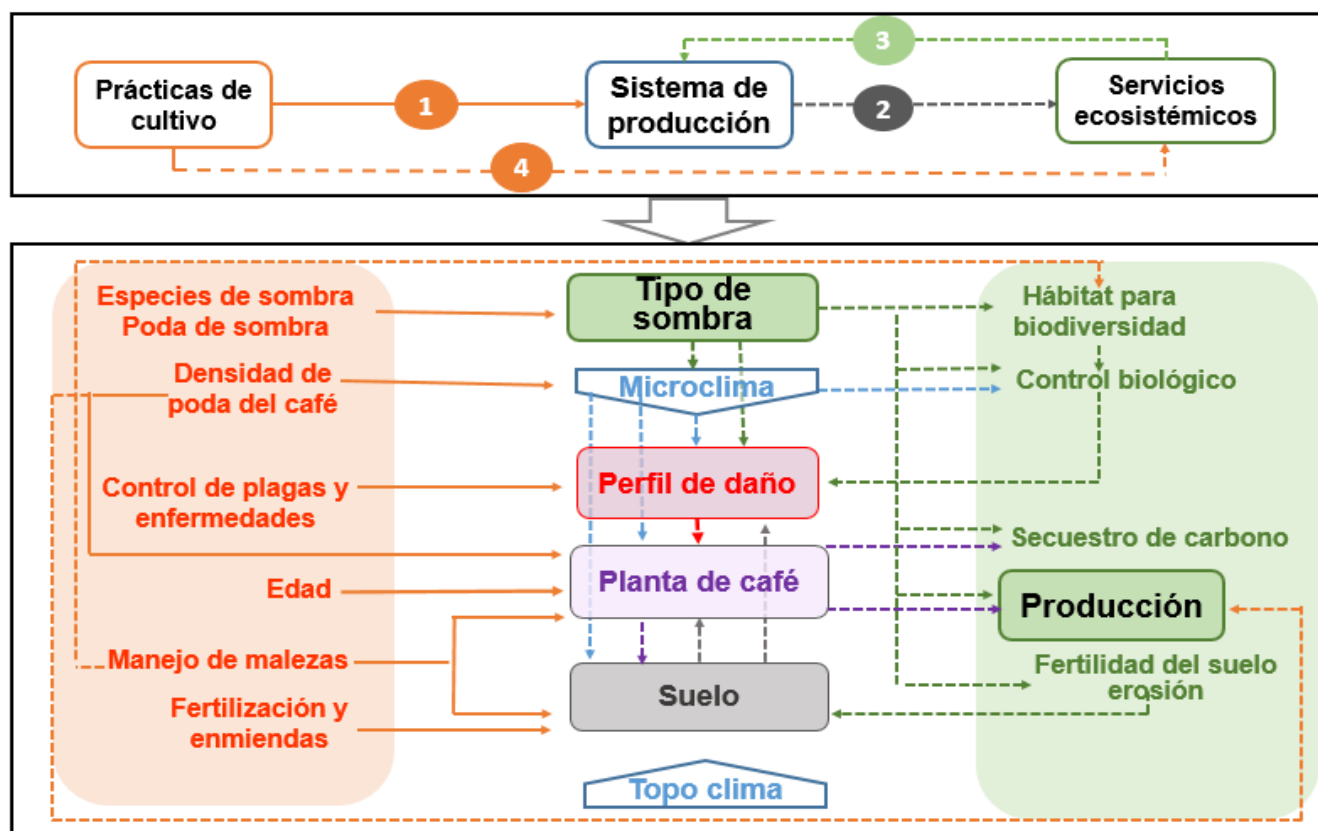


Figura 7. Interrelaciones entre perfil de daños, sombra, rendimiento, prácticas de cultivo y suministro de servicios de los ecosistemas. Fuente: Allinne *et al.* (2016).

6.3. Estimación de las pérdidas de rendimiento en el café

Los esfuerzos para estimar pérdidas son escasos, principalmente para cultivos perennes como café. La necesidad de calificar y cuantificar las pérdidas de rendimiento causadas por plagas y enfermedades se convierten en un factor de suma importancia. Los factores que influyen en la pérdida de producción son numerosos y sus interacciones son complejas.

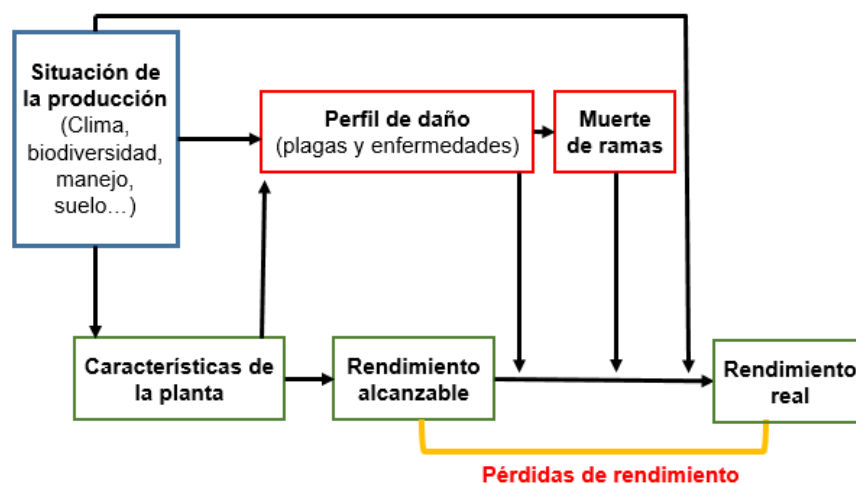


Figura 8. Esquema de las pérdidas de rendimiento, a partir de los rendimientos alcanzables y los rendimientos reales, y los factores que le favorecen. Fuente: Clément (2015).

Las pérdidas de cultivo se obtienen de la diferencia entre los rendimientos alcanzables y el rendimiento real (actual) (Zadocks and Schein, 1979). El rendimiento alcanzable es el rendimiento que puede o podría obtenerse, sin afectación de factores reductores del rendimiento, principalmente, plagas y enfermedades. Mientras que el rendimiento real es el rendimiento que se logra finalmente utilizando los recursos disponibles, como mano de obra e insumos; afectado principalmente por plagas y enfermedades (Willoquet 2014; Allinne *et al.* 2016) (ver figura 8). La cosecha de una planta de café protegida del ataque de plagas y enfermedades por la aplicación de pesticidas es un acercamiento del rendimiento alcanzable. Clément (2015) construyó un modelo para estimar el rendimiento a partir de una base de datos incluyendo valores de plantas protegidas por fungicidas y plantas no protegidas. El rendimiento se explica por diferentes componentes, como el número de nudos fructíferos por planta antes de la cosecha, y también por factores de reducción como descriptores de plagas y enfermedades y el número de ramas muertas. En este modelo también se analizan todos los factores que pueden estar asociados a esas pérdidas de rendimiento, como la sombra, el suelo, el topoclima, las prácticas de manejo, entre otras (Allinne *et al.* 2016; Cerda *et al.* 2015). Actualmente se está trabajando sobre ese modelo simple, no solo para estimar pérdidas primarias, sino también pérdidas secundarias, obtenidas por efectos negativos del año anterior.

7. Importancia de la sombra para la regulación de plagas y enfermedades, como un servicio ecosistémico

Los efectos de los árboles de sombra sobre las plagas y enfermedades dependen en primera instancia de los requerimientos del insecto o del patógeno considerado, así como también de los agentes de control de estas plagas y enfermedades. Estos efectos, de manera general son complejos y muchas veces

contradictorios. Al respecto López-Bravo *et al.* (2012), Mouen Bedimo *et al.* (2012), mencionan algunos mecanismos de interacción entre la sombra y las plagas y enfermedades, los que además podemos apreciar en la figura 9:

a) Aumento de los nichos, a través de la incorporación de árboles de sombra

Al aumentar las especies arbóreas y al hacerse más compleja la estructura del dosel en el cafetal, se proveen nichos para que coexista un mayor número de especies, incluyendo especies y aves que pueden hacer cierto biocontrol sobre algunas plagas del cafeto como la broca del café (*Hypothenemus hampei*) (Armbrecht y Gallego 2007; Kellermann *et al.* 2008). Inversamente los árboles también pueden ser huéspedes alternos para plagas y enfermedades, como se ha demostrado para el agente del ojo de gallo del café (*Mycena citricolor*) (Granados 2015). Incluso para la broca, se ha comprobado que el coleóptero puede refugiarse y reproducirse en otras frutas que no sean las cerezas del café (Damon 2000).

b) Alteración del microclima

Los árboles de sombra modifican las condiciones del microclima, este efecto, puede ayudar a regular ciertas plagas y enfermedades, pero también favorecer otras. Por ejemplo, algunas especies de árboles (*Ingas spp.*, *Erythrina poeppigiana*) (ver anexo 12), pueden reducir la energía cinética de las gotas de lluvia y por lo tanto el “*splashing*” (dispersión por salpique) (Thériez 2015, Cabon 2015), en este sentido, los árboles de sombra contribuyen a disminuir la propagación del Coffee Berry Disease o CBD (*Colletotrichum kahawae*, un hongo que pudre los granos de café, aún no presente en América Latina) (Mouen Bedimo *et al.* 2008, 2012). Sin embargo, otras especies de árboles (*Cordia alliodora* y otras sp.) (ver anexo 12), pueden aumentar la energía cinética de las gotas (Thériez 2015, Cabon 2015) y favorecer de esta manera la dispersión de las esporas de roya del café, principalmente con lluvias mayores a 20 mm (Pico Rosado 2014) (ver anexo 13). La reducción de la velocidad del viento en los sistemas agroforestales, también permite proteger las hojas del cafeto contra daños mecánicos y reducir la entrada de hongos oportunistas (Rapidel *et al.* 2015).

Por otro lado, la sombra, a través de su efecto regulador de la carga fructífera ayuda a eliminar casi totalmente la antracnosis, asociada a hongos del género *Colletotrichum* (Rapidel *et al.* 2015) y reducir la incidencia y severidad de roya del café (López-Bravo 2012). Agentes de biocontrol, como *Beauveria bassiana*, para la broca o *Lecanicillium lecanii*, para el hongo responsable de la roya del café pueden encontrar en los cafetales con sombra condiciones adecuadas para su sobrevivencia y proliferación (Staver *et al.* 2001; Pico Rosado 2014). Sin embargo, estas condiciones del microclima, de manera contradictoria, también pueden beneficiar a otros patógenos. Por ejemplo, se sabe que la sombra incrementa los ataques de ojo de gallo (Avelino *et al.* 2007) y mal de hilachas (Schroth *et al.* 2000). Así mismo, se supone que la sombra también favorece la broca del café, probablemente por la mayor humedad relativa, la cual aumenta la longevidad y la fecundidad del insecto (Baker *et al.* 1994). Sin embargo, Cerda *et al.* (2015) encontró menos roya, menos severidad de plagas y enfermedades y menor cantidad de ramas muertas, en café cultivado bajo sombra diversificada, en comparación con café cultivado a pleno sol, ambos sistemas (sol y sombra), manejados con alto manejo. Esto último sugiere que los cafetales con árboles de sombra (diversificados), con buen manejo, pueden contribuir a la regulación de plagas y enfermedades. Avelino *et al.* (2015), por su lado, sugieren que el impacto de la roya bajo sombra podría ser menor que a pleno sol. Estos autores observaron, en efecto, plantaciones altamente atacadas a pleno sol y bajo sombra, pero muchas más defoliaciones fuertes y muerte de ramas

a pleno sol que bajo sombra. Posiblemente, el estrés de las plantas a pleno sol (altas temperaturas en especial) hizo que éstas sufrieran más de los ataques de roya.

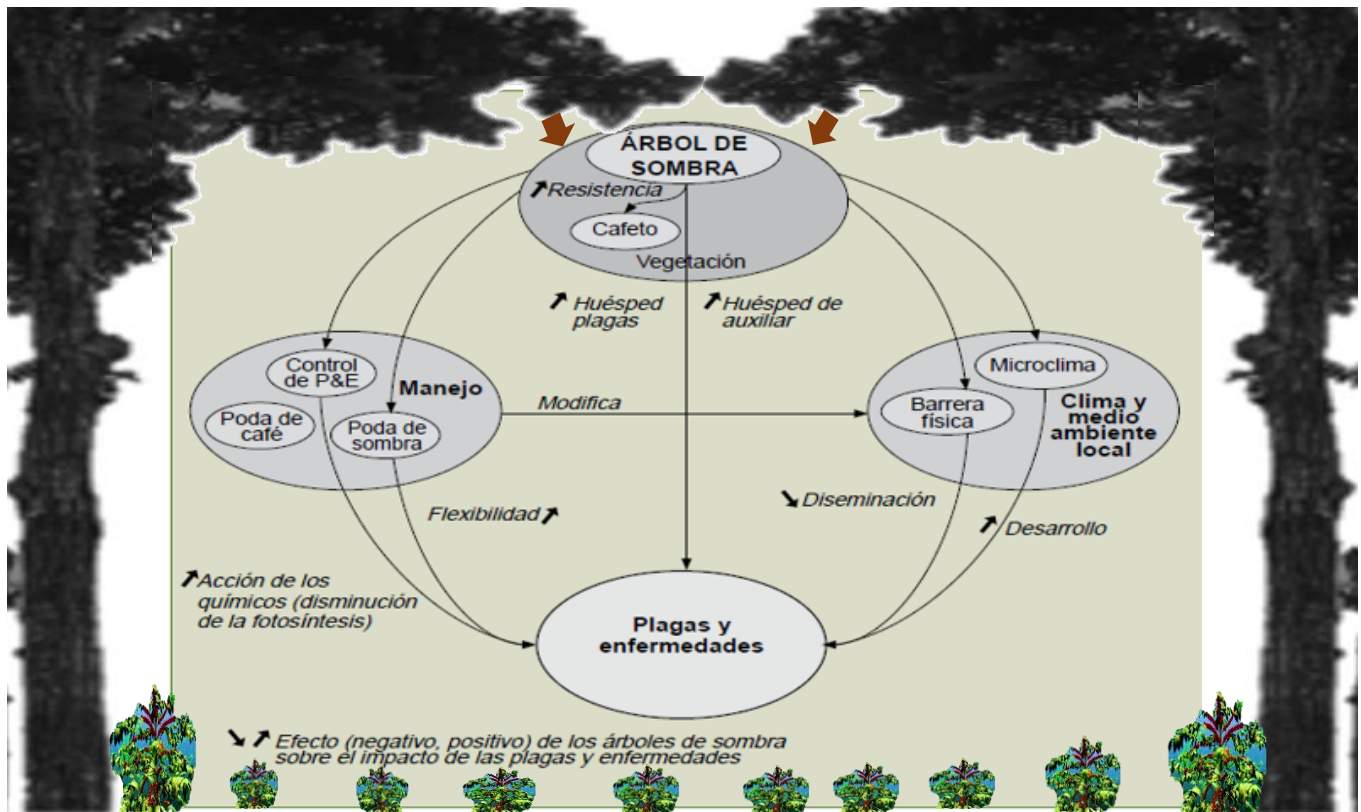


Figura 9. Efectos de los árboles de sombra sobre las plagas y enfermedades del café. Fuente: Rapidel *et al.* (2015)

c) También puede haber efectos contradictorios según la localidad

Por ejemplo, en relación con la roya del café, se sabe que esta enfermedad afecta mucho más a plantas con alta productividad (López-Bravo *et al.* 2012; Avelino *et al.* 2006), con lo que se verían más afectados los cafetos a pleno sol, considerando el efecto de la sombra de regular la carga fructífera. Sin embargo, se sabe también que la disminución de la luz solar, de los extremos de temperatura y el aumento del tiempo de mojadura de los órganos tiende a favorecer el desarrollo de la roya, lo que explica las contradicciones encontradas por López-Bravo *et al.* (2012). Así mismo, durante la epidemia severa del 2012 se logró evidenciar un mejor comportamiento de las plantaciones bajo sombra, en comparación con cafetales expuestos al pleno sol (Cressey 2013, Villarreyna 2014; Avelino *et al.* 2015). Según Schroth *et al.* (2000) los árboles de sombra en sistemas agroforestales tropicales, pueden servir como barreras a la propagación de plagas y patógenos. Los árboles de sombra reducen la velocidad del viento en la plantación de café (Beer *et al.* 1998) y probablemente afectan de esta manera a diferentes patógenos que son transportados por el viento como la roya del café (Avelino *et al.* 2011).

El servicio de regulación de plagas y enfermedades se puede medir de manera eficiente, a través de la evaluación de las pérdidas de producción, ya que los perfiles de daño observados pueden ser muy distintos en diferentes sistemas agroforestales. Algunas plagas o enfermedades podrían así encontrarse bajo una condición A de manejo y no bajo una condición B, mientras que otras podrían encontrarse en la condición B y no en la condición A. Para poder comparar el servicio de regulación de plagas y enfermedades proporcionado por las condiciones A y B, es necesario evaluar las pérdidas. Un sistema

con menos pérdidas, aunque con cierto nivel de plagas y enfermedades (perfil de daño), será el que ofrece un servicio más efectivo (Avelino *et al* 2011; Avelino *et al.* 2015).

8. Conclusiones

La sombra no es el único factor con influencia sobre los rendimientos de los cafetos cultivados en sistemas agroforestales (diversificados). Existe una serie de factores o aspectos que también tienen influencia y que deben ser considerados, entre ellos, el topoclima, el suelo, las plagas y enfermedades, y el manejo general que cada productor realice de todo el sistema. Un manejo eficiente del café y de todo el sistema diversificado asociado, puede conllevar a rendimientos similares a los obtenidos a plenos sol. A esto hay que sumarle, que el sistema diversificado puede aportar otros ingresos económicos por venta de productos de los cultivos asociados y además favorecer otros servicios ecosistémicos como, secuestro de carbono, regulación de plagas y enfermedades, fertilización del suelo, entre otros. También es importante recalcar que los sistemas agroforestales disminuyen la fluctuación de los ingresos de los productores por reducir la bienalidad de la producción.

Las pérdidas de rendimiento ocasionadas por plagas y enfermedades, haciendo una valoración conjunta, con ayuda de perfiles de daño, se muestran similares en sistemas cultivados a pleno sol y sistemas con árboles de sombra (diversificada), manejados con el mismo nivel de intensidad. Inclusive, hay tendencia a mayores pérdidas en los sistemas al pleno sol. Por otro lado, el sistema diversificado puede soportar mejor las condiciones de bajo manejo, ya que según evaluaciones realizadas en sistemas con bajo manejo (pleno sol y sombra), las pérdidas fueron mucho mayores en el sistema al pleno sol. Este hallazgo sigue confirmando que los cafetales arbolados pueden ser más sostenibles, sobre todo en condiciones de bajos precios, que son una de las mayores limitantes para que el agricultor haga un buen manejo de su cafetal.

Cuando el topoclima y el suelo son favorables para el desarrollo de las plagas y enfermedades, la sombra diversificada puede aumentar la producción total del sistema, es decir, puede compensar los daños por plagas y enfermedades, con otros productos que pueden extraerse del sistema. Cuando el topoclima y el suelo desfavorecen el desarrollo de plagas y enfermedades, la incorporación de árboles de sombra y la diversidad asociada al sistema, ofrece la oportunidad de mejorar las prestaciones de servicios ecosistémicos, sin reducir la producción (bajo un manejo adecuado). Por lo tanto, los sistemas con sombra diversificada se presentan como una alternativa para reducir pérdidas de rendimiento y mejorar los beneficios de las familias.

9. Agradecimientos

“This project is part of the International Climate Initiative (ICI). German Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation, Building and Nuclear Safety (BMUB) supports this initiative on the basis of a decision adopted by the German Bundestag.”

10. Literatura citada

- Allinne, C.; Savary, S.; Avelino, J. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 222:1-12.
- Altieri, M., 1999. The ecological role of biodiversity in agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 74:19–31.
- Arcila Pulgarín, J. Capítulo 6. 2007a. Factores que determinan la productividad del cafetal. *In* Arcila pulgarín, J.; Farfán, F.; Moreno, A.B.; Salazar, L.F.; Hincapié, E.; CENICAFE. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Colombia. p. 145-159.
- Arcila Pulgarín, J. Capítulo 6. 2007b. Densidad de siembra y productividad de los cafetales. *In* Arcila pulgarín, J.; Farfán, F.; Moreno, A.B.; Salazar, L.F.; Hincapié, E.; CENICAFE. Sistemas de producción de café en Colombia. Chinchiná, Colombia. p. 145-159.
- Armbrrecht, I; Gallego, MC. 2007. Testing ant predation on the coffee berry borer in shaded and sun coffee plantations in Colombia. *Entomologia Experimentalis Et Applicata* 124: 261-267.
- Avelino, J.; Cabut, S.; Barboza, B.; Barquero, M.; Alfaro, R.; Esquivel, C.; Durand, J.F.; Cilas, C. 2007. Topography and Crop Management are Key Factors for the Development of American Leaf Spot Epidemics on Coffee in Costa Rica. *Phytopathology* 97: 1532-1542.
- Avelino, J.; Cristancho, M.; Georgiou, S.; Imbach, P.; Aguilar, L.; Bornemann, G.; Läderach, P.; Anzueto, F.; Hruska, A.; Morales, C. 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008–2013): impacts: plausible causes and proposed solutions. *Food Secur.* 7, 303–321.
- Avelino, J.; Rivas, G. 2013. La roya anaranjada del cafeto <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01071036>, 47 p.
- Avelino, J.; Ten Hoopen, G.M.; DeClerck, F.A.J. 2011. Ecological mechanisms for pest and disease control in coffee and cacao agroecosystems of the Neotropics. *In*: Rapidel, B.; DeClerck, F.A.J.; Le Coq, J.F.; Beer, J. (Eds.), *Ecosystem Services from Agriculture and Agroforestry Measurement and Payment*. Earthscan, pp. 91– 117.
- Avelino, J.; Toledo, J.C.; Medina, B. 1995. Desarrollo del ojo de gallo (*Mycena citricolor*) en una finca del Norte de Guatemala y evaluación de los daños provocados por esta enfermedad. XVI Simposio de caficultura latinoamericana, 1993-10-25/1993-10-29. Managua, Nicaragua: IICA-PROMECAF. 8 p.
- Avelino, J.; Willocquet, L.; Savary, S. 2004. Effects of crop management patterns on coffee rust epidemics *Plant pathology* 53(5): 541-547.
- Avelino, J; Zelaya, H; Merlo, A; Pineda, A; Ordoñez, M; Savary, S. 2006. The intensity of a coffee rust epidemic is dependent on production situations. *Ecological Modelling* 197: 431-447.
- Baraër, T. 2013. Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, CIRAD/CATIE. 36 p.
- Beer, J.; Muschler, R.; Kass, D.; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforest Syst* 38:139–164
- Bouroncle, C.; Imbach, P.; Laderach, P.; Rodríguez, B.; Medellín, C.; Fung, E. 2014. La agricultura de Nicaragua y el cambio climático: ¿Dónde están las prioridades para la adaptación? CCAFS/CGIAR. 8 p.
- Cabon, M. 2015. Effect of shade on microclimate, soil fertility and productivity of coffee trees in Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Report Internship job. CIRAD-CATIE. 31 p.

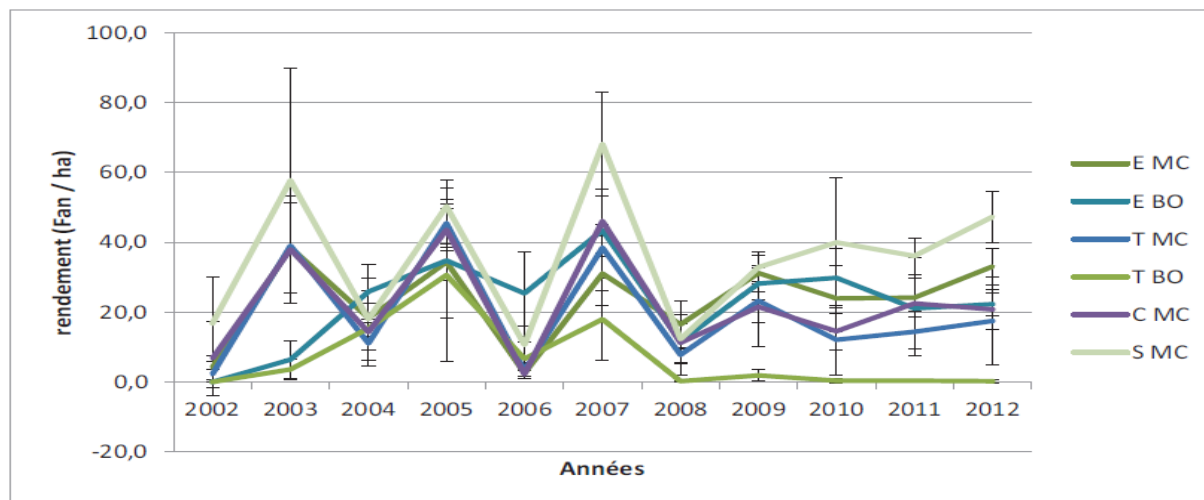
- Campanha, M.; Santos, R.; de Freitas, G.; Martinez, H.; Garcia, S.; Finger, F. 2005. Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. *Agroforestry Systems* 63:75-82.
- CEPAL (Comisión Economía para América Latina y el Caribe). 2009. Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe. Santiago, Chile. Publicación de las Naciones Unidas. 162 p.
- Cerda, R.; Allinne, C.; Krolczyk, L.; Mathiot, C.; Clément, E.; Harvey, C.A.; Aubertot, J.N.; Tixier, P.; Gary, C.; Avelino, J. 2015. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. 5th International Symposium for Farming Systems Design, 7-10 September 2015, Montpellier, France. 2 p.
- Cheatham, M.R., Rouse, M.N., Esker, P.D., Ignacio, S., Pradel, W., Raymundo, R., Sparks, A.H., Forbes, G.A., Gordon, T.R., Garrett, K.A., 2009. Beyond yield: plant disease in the context of ecosystem services. *Phytopathology* 99, 1228–1236.
- Cressey, D. 2013. Coffee rust regains foothold. Researchers marshal technology in bid to thwart fungal outbreak in Central America. *Nature* 493:587.
- DaMatta, F.M., 2004. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. *Field Crops Research* 86: 99-114.
- DaMatta, F.M.; Ronch, C.P.; Maestri, M.; Barros, R.S. 2007. Ecophysiology of coffee growth and production. *Braz. J. Plant Physiol.* 19, 485-510.
- DaMatta, F.; Rodriguez, N. 2007. Producción sostenible de cafetales en sistemas agroforestales del Neotrópico: una visión agronómica y ecofisiológica. *Agronomía Colombiana* 25(1): 113-123.
- Damon A. 2000. A review of the biology and control of the coffee berry borer, *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae). Chiapas, México. *Bulletin of Entomological Research* 90: 453-465.
- Duicela Guambi, L.A. 2011. Manejo sostenible de fincas cafetaleras: Buenas prácticas en la producción de café arábico y gestión de la calidad en las organizaciones de productores. Porto Viejo, Ecuador, Imprenta CGRAF, Manta. COFENAC (Consejo Cafetalero Nacional). 309 p.
- Estivariz, C.J. 1997. Efecto de sombra sobre floración y producción de *Coffea arabica* var. Caturra, después de una poda completa en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag. Sc. CATIE. CR.
- Gil Vallejo, L.F.; Varzea, V.M.; Do Ceu Silva, M. 2002. La enfermedad de las cerezas del café (CBD), causada por *Colletotrichum Kahawae*. *Cenicafé. Avances Técnicos* 298. 8 p.
- Ghini, R.; Hamada, E.; Pedro Júnior, M.J.; Marengo, J.A.; Ribeiro do Valle Gonçalves, R. 2008. Risk analysis of climate change on coffee nematodes and leaf miner in Brazil. *Pesquisa agropecuária Brasileira* 43(2): 187-194.
- Granados montero, M del M. 2015. Estudio de la epidemiología y alternativas de manejo agroecológico del ojo de gallo (*mycena citricolor*) en cafeto bajo sistemas agroforestales en Costa Rica. Tesis Ph.D. Rodrigo Facio, Costa Rica. UCR. 256 p.
- Haggar, J; Barrios, M; Bolaños, M; Merlo, M; Moraga, P; Munguia, M; Ponce, A; Romero, S; Soto, G; Staver, C; Virginio, E. 2011. Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. *Agroforestry Systems* 82: 285-301.
- Herzog, F. 1994. Multipurpose shade trees in coffee and cocoa plantations in Côte d'Ivoire. *Agroforestry Systems* 27:259-267.
- IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). 1988. Curso regional sobre nutrición mineral del café. San José, Costa Rica. Memoria del curso. 271 p.
- Jaramillo-Robledo, A.; Cháves-Córdoba, B. 1999. Aspectos hidrológicos en un bosque y en plantaciones de café (*Coffea arabica* L.) al sol y bajo sombra. *Cenicafé* 50(2): 97-105.

- Kellermann, J.L.; Johnson, M.D.; Stercho, A.M.; Hackett, S.C. 2008. Ecological and economic services provided by birds on Jamaican Blue Mountain Coffee Farms. *Conservation Biology* 22: 1177-1185.
- Lin, B.B. 2010. The role of agroforestry in reducing water loss through soil evaporation and crop transpiration in coffee agroecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 150(4): 510-518.
- López-Bravo, D.F.; Virginio-Filho, E.d.M.; Avelino, J. 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions *Crop Protection* 38: 21-29.
- Maestri M, Santos-Barros, R. 1981. *Ecofisiología de cultivos tropicales*. IICA. San José, Costa Rica. 50 pp.
- Malézieux, E. 2012. Designing cropping systems from nature. *Agron. Sustain. Dev.* 32: 15–29.
- Moraga Quezada, P.; Bolaños Taleno, R.I.; Pilz, M.; Munguía Hernández, R.; Jürgen Pohlen, H.A.; Barrios, M.; Jeremy, H.; Gamboa Moya, W. 2011. Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (*coffea arabica* l.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. *La Calera* 11(17): 41-47.
- Mouen Bedimo, J.A.; Dufour, B.P.; Cilas, C.; Avelino, J. 2012. Effects of shade trees on *Coffea arabica* pests and diseases. *Cahiers Agricultures* 21(2-3): 89-97.
- Mouen Bedimo, J.A.; Njiayouom, I.; Bieysse, D.; Ndoumbè Nkeng, M; Cilas, C; Nottéghem, J.L. 2008. Effect of shade on Arabica coffee berry disease development: Toward an agroforestry system to reduce disease impact. *Phytopathology* 98:1320-1325.
- Muller, R.A.; Berry, D.; Avelino, J.; Bieysse, D. 2009. Coffee diseases. In: Wintgens, J.N. (Ed.), *Coffee: Growing, Processing, Sustainable Production: A Guidebook for Growers, Processors, Traders, and Researchers*. Wiley-VCH, pp. 495–549.
- Muschler, R.G., 1997. Efectos de sombra de *Erythrina poeppigiana* sobre *Coffea arabica* vars. Caturra y Catimor. *Memorias del XVIII Simposium Latinoamericano de Cafecultura*, September 1997. San Jose, Costa Rica, IICA. pp. 157–162.
- Ovalle-Rivera, O.; Läderach, P.; Bunn, C.; Obersteiner, M.; Schroth, G. 2015. Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS ONE* 10(4): e0124155. doi:10.1371/journal.pone.0124155.
- Perfecto, I.; Vandermeer, J.; Mas, A.; Pinto, L.S. 2005. Biodiversity yield, and shade coffee certification. *Ecol. Econ.* 54, 435–446.
- Pico Rosado, J.T. 2014. Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de *Hemileia vastatrix* en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 65 p.
- Rapidel, B.; Allinne, C.; Cerdan, C.; Meylan L.; Virginio Filho E.D.M.; Avelino J. 2015. In: Montagnini F.; Somarriba E.; Murgueitio E.; Fassola H.; Eibl B. (Eds.). *Sistemas Agroforestales: Funciones Productivas, Socioeconómicas y Ambientales*. Colombia: CATIE, p. 5-20. (Serie técnica. Informe técnico CATIE. 402 p).
- Ratnadass, A., Fernandes, P., Avelino, J., Habib, R., 2012. Plant species diversity for sustainable management of crop pests and diseases in agroecosystems: a review. *Agron. Sustain. Dev.* 32, 273–303.
- Rosenzweig, C.; Hillel, D. 1998. *Climate change and the global harvest: potential impacts of the greenhouse effect on agriculture*. Oxford University Press, New York. 324 p.
- Schroth, G.; Krauss, U.; Gasparotto, L.; Duarte Aguilar, J.A.; Vohland, K. 2000. Pests and diseases in agroforestry systems of the humid tropics. *Agroforest Syst* 50:199–241

- Segura Monge, A. 1990. Algunas características fisiológicas del cafeto y su relación con la nutrición mineral. *In* VIII curso regional sobre fundamentos de la caficultura moderna. Turrialba, Costa Rica. IICA.
- Siles, P.; Harmand, J.M.; Vaast, P. 2010. Effects of *Inga densiflora* on the microclimate of coffee (*Coffea arabica* L.) and overall biomass under optimal growing conditions in Costa Rica. Agroforest system. Published online. 18 p.
- Staver, C; Guharay, F; Monterroso, D. and Muschler, R. 2001. Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. *Agroforestry Systems* 53(2): 151-170.
- Soto-Pinto, L., Perfecto, I., Castillo-Hernández, J.; Caballero-Nieto, J. 2000. Shade effect on coffee production at the northern Tzeltal zone of the state of Chiapas, Mexico. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 80: 61-69.
- Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía. CIRAD. 32 p.
- Tscharntke, T.; Clough, Y.; Bhagwat, S.A.; Buchori, D.; Faust, H.; Hertel, D.; Hölscher, D.; Juhrendt, J.; Kessler, M.; Perfecto, I.; Scherber, C.; Schroth, G.; Veldkamp, E.; Wanger, T.C. 2011. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes—a review. *J. Appl. Ecol.* 48, 619–629
- Vignola, R.; Harvey, C.A.; Bautista-Solis, P.; Avelino, J.; Rapidel, B.; Donatti, C.; Martinez, R.; 2015. Ecosystem-based adaptation for smallholder farmers: Definitions, opportunities and constraints. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 211, 126-132.
- Villarreyna Acuña, R.A. 2014. Análisis de las condiciones de manejo que propiciaron el impacto de la roya (*Hemileia vastatrix*) en la zona cafetalera de los municipios de Jinotega, El Tuma-La Dalia y San Ramón, Nicaragua. Tesis Mg. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 68 p.
- Villarreyna Acuña, R.A. 2016. Efecto de la sombra sobre las plagas y enfermedades, a través del microclima, fenología y estado fisiológico del cafeto. Reporte proyecto CASCADA/CIRAD. 33 p.
- Wegbe, K.; Cilas, C.; Decazy, B.; Alauzet, C.; Dufour, B. 2003. Estimation of Production Losses Caused by the Coffee Berry Borer (Coleoptera: Scolytidae) and Calculation of an Economic Damage Threshold in Togolese Coffee Plots. *Journal of Economic Entomology* 96(5): 1473-1478.
- Wintgens, J.N. 2004. Coffee: Growing, Processing, Sustainable production. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH. 976 p. ISBN: 3-527-30731-1.

11. Anexos

Anexo 1. Rendimientos de café (figura 11) y resultados del análisis de contenido de nitrógeno en la tabla bajo la figura. Observando ambos se puede comparar y ver que los datos de contenido de nitrógeno están acordes con los datos de rendimiento.



Fan : fanegas

Figure 11 : Rendements en café dans les six types de parcelles étudiées pour la période 2002-2012

Source : De Melo E. (2013a)

Row Labels	Average of N-mass branches	Average of N-mass cep	Average of N-mass total	Average of N-mass feuilles
SMC	4,58	22,58	32,05	4,89
CMC	2,10	15,22	19,77	2,46
EMC	3,71	17,72	26,62	5,18
TMC	1,61	11,06	14,84	2,17
EBO	2,42	17,47	23,49	3,59
TBO	0,58	8,84	9,64	0,21

CMC= Cashá manejo convencional, **EBO=** Erythrina bajo orgánico, **EMC=** Erythrina medio convencional, **SMC=** Sin sombra medio convencional, **TBO=** Terminalia bajo orgánico, **TMC=** Terminalia medio convencional

Annexe 4 : Minéralomasse (C:N) en azote des trois compartiments par parcelle étudiée

Nota: de los tratamientos con sombra de *Erythrina* con manejo medio convencional fue quién obtuvo los niveles de nitrógeno más cercanos al pleno sol y lo mismo puede observarse con los rendimientos de los últimos 5 años.

Fuente: Baraër, T. 2013. Déterminants du cycle de l'azote dans des systèmes agroforestiers de caféiers au Costa Rica. Mémoire de fin d'études d'ingénieur, CIRAD/CATIE. 36 p.

Anexo 2. Efecto de la sombra sobre el rendimiento

a) Efecto de la sombra sobre el rendimiento, según el porcentaje de cobertura

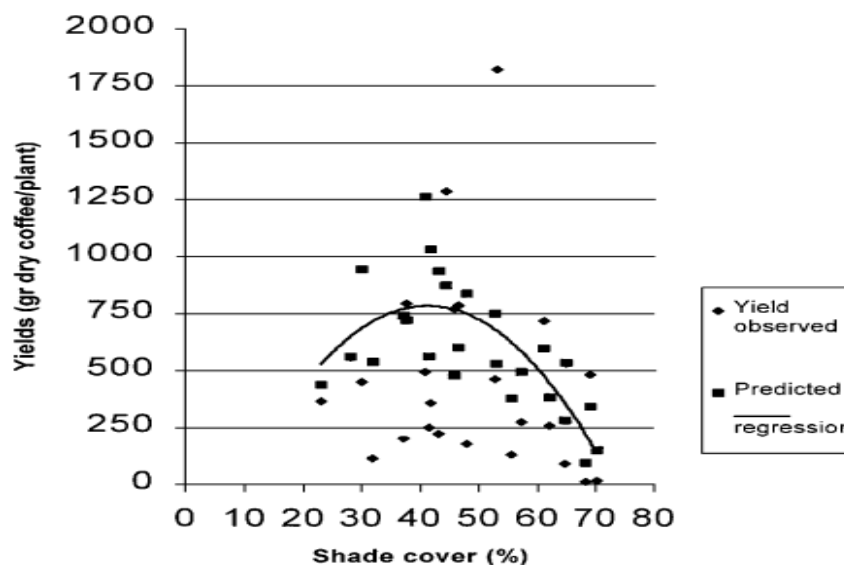


Fig. 3. Effect of shade cover on coffee yields, maintaining coffee density as constant, at 2200 coffee plants/hectare.

b) Efecto de la sombra sobre el rendimiento, en comparación con pleno sol y especies de sombra

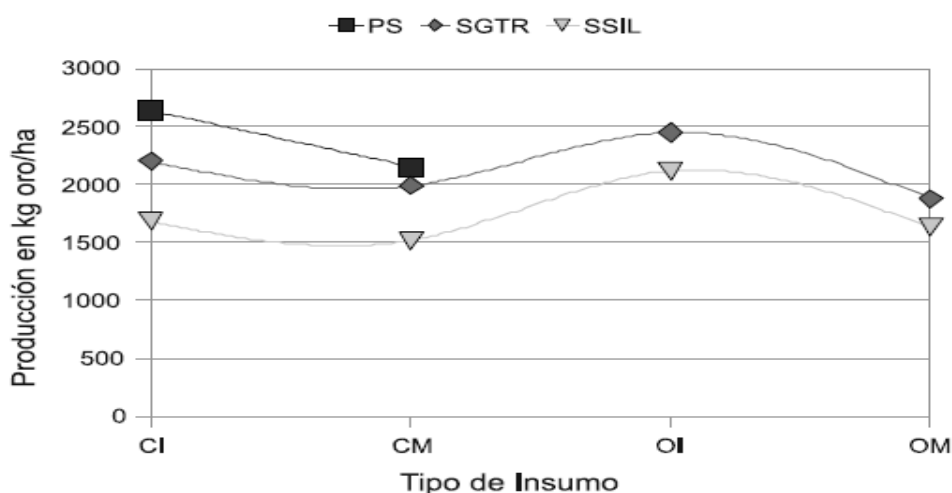


Figura 1. Correlación entre los tipos de sombra y niveles de insumo del promedio acumulado de producción.

PS= Pleno sol, SGTR= *Simaruba glauca* + *Tabebuia rosea*, SSIL= *Samanea Saman* + *Inga laurina*,
CI= Convencional intensivo, CM= Convencional moderado, OI= Orgánico intensivo, OM= Orgánico moderado.

Fuente: Moraga Quezada, P.; Bolaños Taleno, R.I.; Pilz, M.; Munguía Hernández, R.; Jürgen Pohlen, H.A.; Barrios, M.; Jeremy, H.; Gamboa Moya, W. 2011. Árboles de sombra e intensidad del cultivo afectan el rendimiento de café (*coffea arabica* l.) y la valoración ecológica en Masatepe, Nicaragua. La Calera 11(17): 41-47.

Anexo 3. Efecto de la sombra sobre los rendimientos y pérdidas de rendimiento

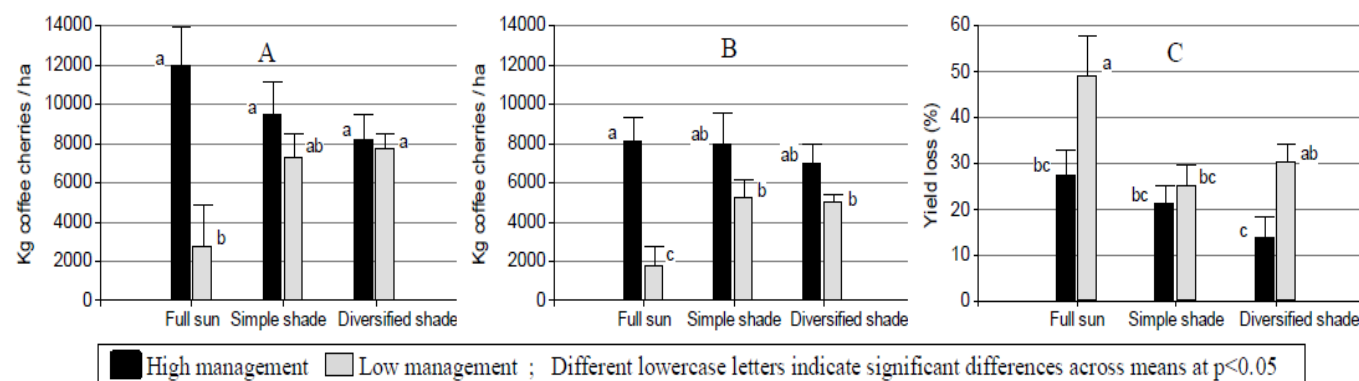


Fig. 2. A) Attainable yields, B) Actual yields, and C) Yield losses of coffee, according to shade and management.

Fuente: Cerda, R.; Allinne, C.; Krolczyk, L.; Mathiot, C.; Clément, E.; Harvey, C.A.; Aubertot, J.N.; Tixier, P.; Gary, C.; Avelino, J. 2015. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. 5th International Symposium for Farming Systems Design, 7-10 September 2015, Montpellier, France. 2 p.

Anexo 4. Efecto de la sombra sobre el rendimiento en relación con plagas y enfermedades

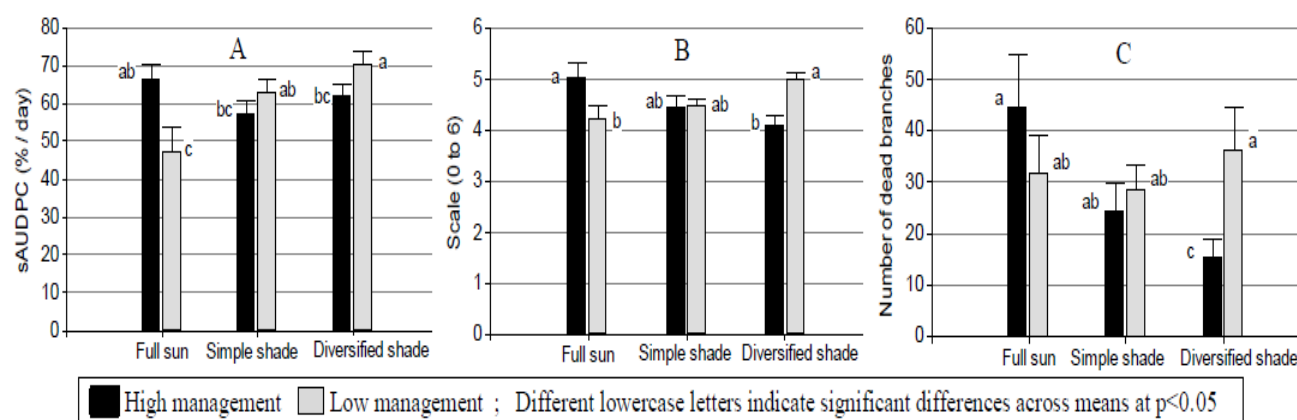
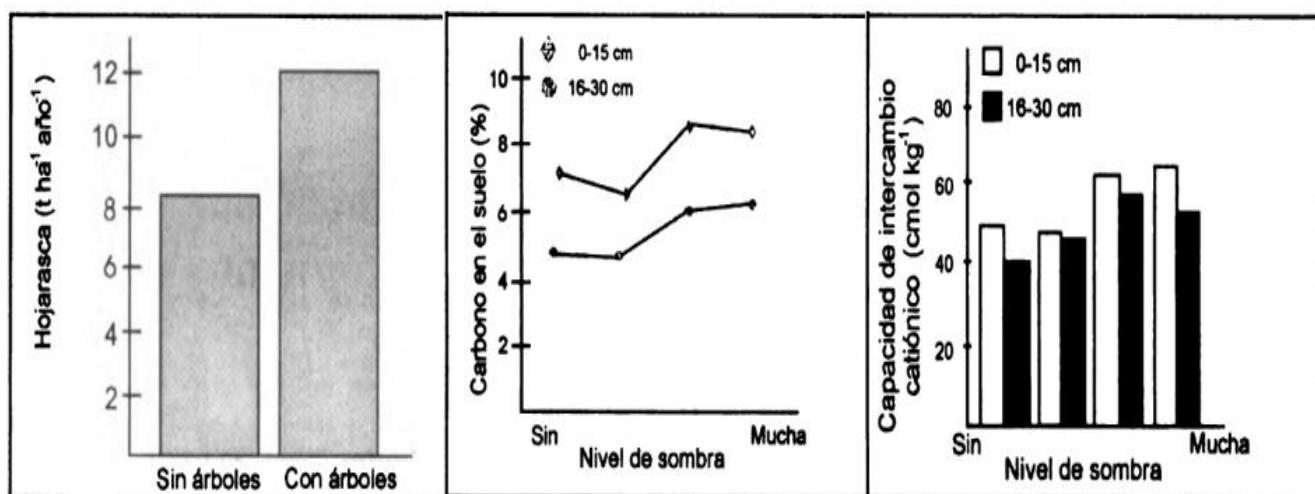


Fig. 1. A) Coffee leaf rust, B) Maximum severity, and C) Dead branches, according to shade and management.

Fuente: Cerda, R.; Allinne, C.; Krolczyk, L.; Mathiot, C.; Clément, E.; Harvey, C.A.; Aubertot, J.N.; Tixier, P.; Gary, C.; Avelino, J. 2015. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. 5th International Symposium for Farming Systems Design, 7-10 September 2015, Montpellier, France. 2 p.

Anexo 5. Efecto de la sombra la fertilidad del suelo

a)



Fuente: Muschler, R. 1999. Árboles en cafetales Turrialba, Costa Rica. CATIE. 139 p. Modificado de Rice R. 1991. Observaciones sobre la transición en el sector cafetalero. Agroecología Neotropical 2: 1-6.

b)

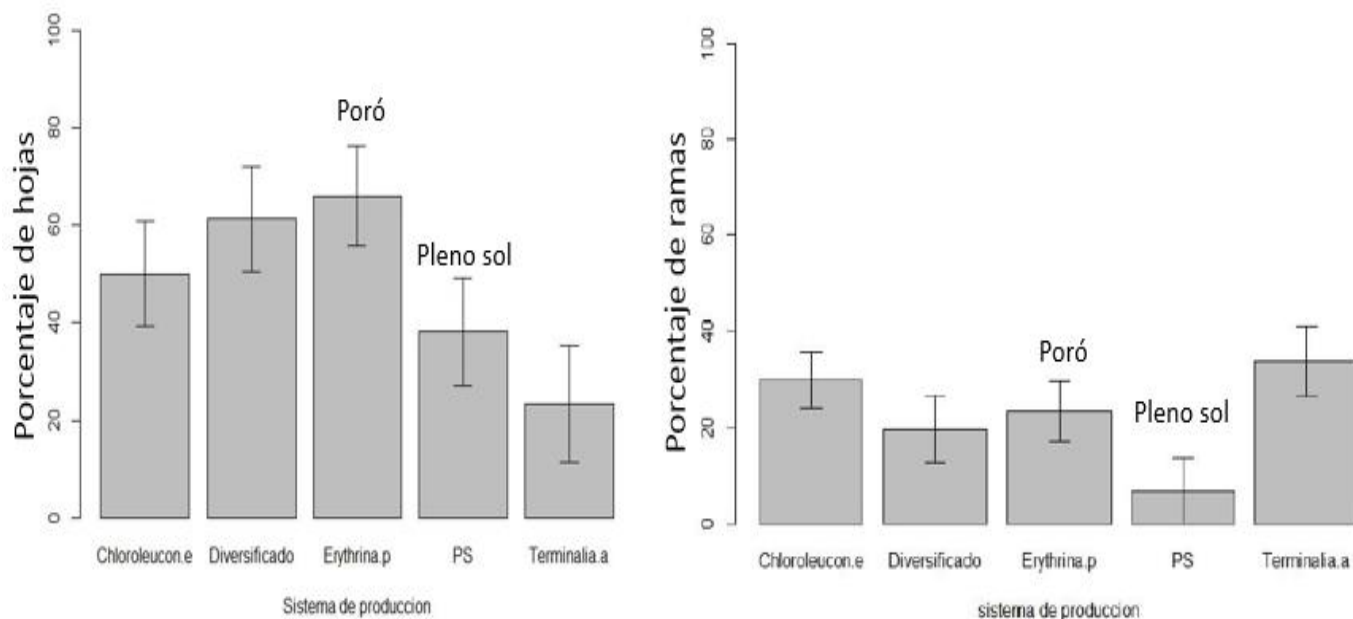


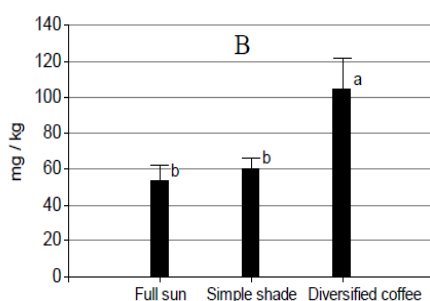
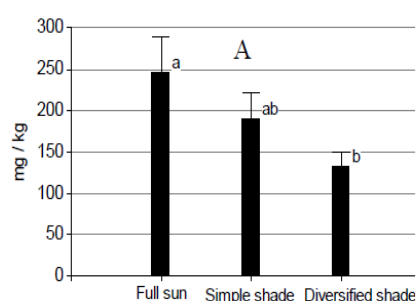
Ilustración 10: Porcentaje de hojas sobre el suelo por sistema de producción; las barras de errores corresponden al error estándar.

Ilustración 11: Porcentaje de ramas sobre el suelo por sistema de producción; las barras de errores corresponden a la error estándar.

Fuente: Thériéz, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.

c)

Anexo 9. Efecto de diferentes niveles de sombra sobre la fertilidad del suelo y cantidad de biomasa sobre la superficie del suelo.



Different lowercase letters indicate significant differences across means at $p < 0.05$

Fig 4. A) Acidity, and B) Potassium in soil.

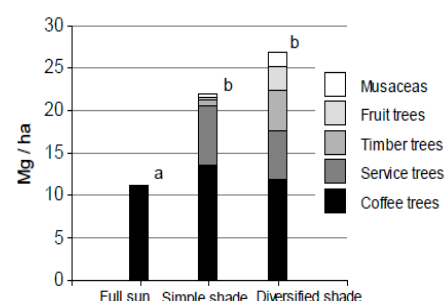


Fig. 5. Above-ground biomass carbon.

Fuente: Cerda, R.; Allinne, C.; Krolczyk, L.; Mathiot, C.; Clément, E.; Harvey, C.A.; Aubertot, J.N.; Tixier, P.; Gary, C; Avelino, J. 2015. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. 5th International Symposium for Farming Systems Design, 7-10 September 2015, Montpellier, France. 2 p.

Anexo 6. Efecto de la sombra sobre el control de malezas

a)

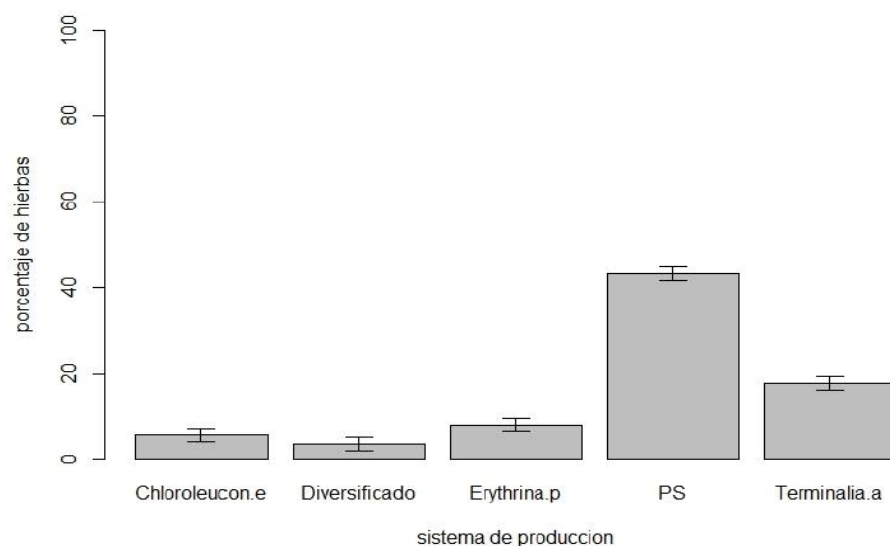


Ilustración 12: Porcentaje de malezas sobre el suelo por sistema de producción; las barras de errores corresponden a la error estándar.

Fuente: Thériéz, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.

b)

Reducción de malezas por efecto de la sombra				
Parámetro	Sol	Poda total de los árboles	Sombra abierta	Sombra densa
(Nivel de sombra, %)	(0)	(3-50)	(46-78)	(77-90)
Cobertura de malezas (%)	80	65	< 5	< 5
Biomasa de malezas (t ha⁻¹)	3.6	2.6	< 0.1	< 0.1
Cobertura de hojarasca (%)	< 30	< 50	100	100
Biomasa de hojarasca (t ha⁻¹)	< 0.5	< 0.5	4.0	4.8

Fuente: Muschler, R. 1999. Árboles en cafetales Turrialba, Costa Rica. CATIE. 139 p. Modificado de Rice R. 1991. Observaciones sobre la transición en el sector cafetalero. Agroecología Neotropical 2: 1-6.

Anexo 7. Descripción de perfiles de daño identificados

Table 6

Description of profiles obtained from the hierarchical cluster analysis based on variables describing pest and disease injuries. For each group, mean and standard deviation (SD) are summarized for all variables. Significant differences between groups were evaluated using an ANOVA performed on a linear model for data with a normal distribution (a), or a Poisson distribution (b). The level of significance: NS at $p > 0.05$. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$. See Table 1 for detailed information on variables.

		LR	BESD	ALSD	LM	BI	RKN	RLN	DB	TB	CC
IP1 (n = 24)	Mean	39.2	29.8	6.6	1.3	0.3	61460	0	26.6	13.6	0.1
	SD	15.3	16.1	8.5	1.8	0.9	101886	0	18.9	17.0	0.3
IP2 (n = 44)	Mean	37.8	15.9	7.1	0.9	0.8	41393	499	3.7	1.0	0.1
	SD	19.4	7.8	9.6	0.9	1.4	26664	1622	4.6	3.2	0.4
IP3 (n = 24)	Mean	15.0	26.1	4.7	5.7	2.9	14060	2180	4.0	0.0	5.0
	SD	19.2	11.3	7.6	3.3	2.3	14621	3131	5.2	0.0	6.3
IP4 (n = 44)	Mean	7.8	27.2	22.3	2.8	9.6	9589	4538	2.5	0.2	1.1
	SD	11.7	10.4	22.0	2.3	6.9	13571	5235	4.5	1.1	1.9
	Pr	****	***b	***b	***b	***b	****	****	***b	****	***b

LF= roya del café, BESD= Mancha de hierro, LSD= Ojo de gallo, LM= Minador de la hoja, BI= Quema o derrite, RKN= Nematodo de los nudos de la raíz, RLN= Nematodo de daños en la raíz, BD= Dieback/antracnosis, TB= Mal de hilachas, CC= *Ceratocytis fimbriata*.

Fuente: Allinne, C.; Savary, S.; Avelino, J. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. Agriculture, Ecosystems and Environment 222:1-12.

Anexo 8. Asociaciones entre perfiles de daño por plagas y enfermedades, rendimiento y otros perfiles (topoclima, suelo, producción, prácticas de cultivo)

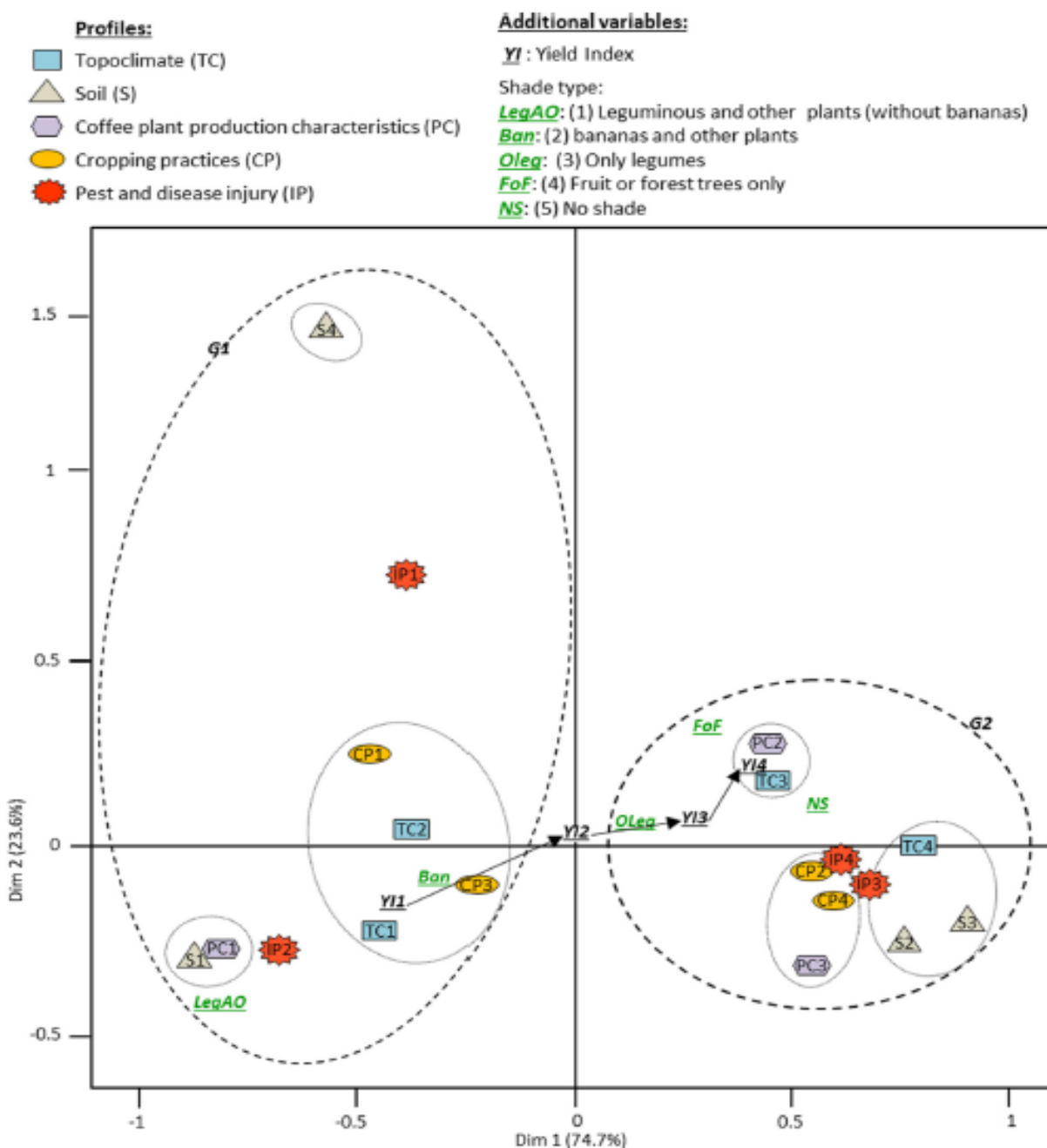


Fig. 2. Graphical representation of the simple correspondence analysis performed on a contingency Table where rows are topoclimates (TC1–TC4), soils (S1–S4), coffee plant production characteristics (PC1–PC3) and cropping practices (CP1–CP4), and columns are injury profiles (IP1–IP4). Two additional variables are represented; (i) shade type: LegAO (legumes and other plants), Ban (bananas and other plants), Oleg (only legumes), FoF (fruit or forest trees only) and NS (no shade), (ii) yield index (YI), a proxy indicator of attainable yield. Dotted circles (G1 and G2) represent the profile clustering obtained with a cluster analysis performed on the correspondence analysis dimensions.

Fuente: Allinne, C.; Savary, S.; Avelino, J. 2016. Delicate balance between pest and disease injuries, yield performance, and other ecosystem services in the complex coffee-based systems of Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 222:1-12.

Anexo 9. Relación entre incidencia y severidad de la roya del café, bajo sombra regulada y pleno sol

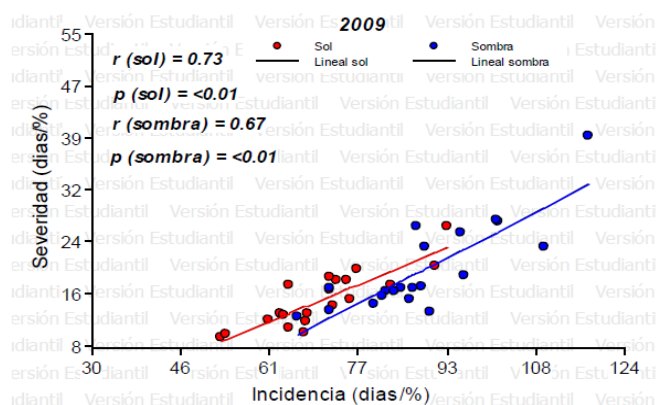


Figura 23. Relación entre incidencia y severidad expresadas en AUDPC - AF (valores transformados por raíz cuadrada), (2009).

AUDPC-AF= Área bajo la curva de progreso de la enfermedad del acumulado final

Fuente: López Bravo, D.F. 2010. Efecto de la carga fructífera sobre la roya (*Hemileia vastatrix*) del café, bajo condiciones microclimáticas de sol y sombra, en Turrialba, Costa Rica. Tesis MagSc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 99 p.

Anexo 10. Efecto de la sombra sobre porcentaje de hojas con roya, según su relación con la carga fructífera

D.F. López-Bravo et al. / Crop Protection 38 (2012) 21–29

25

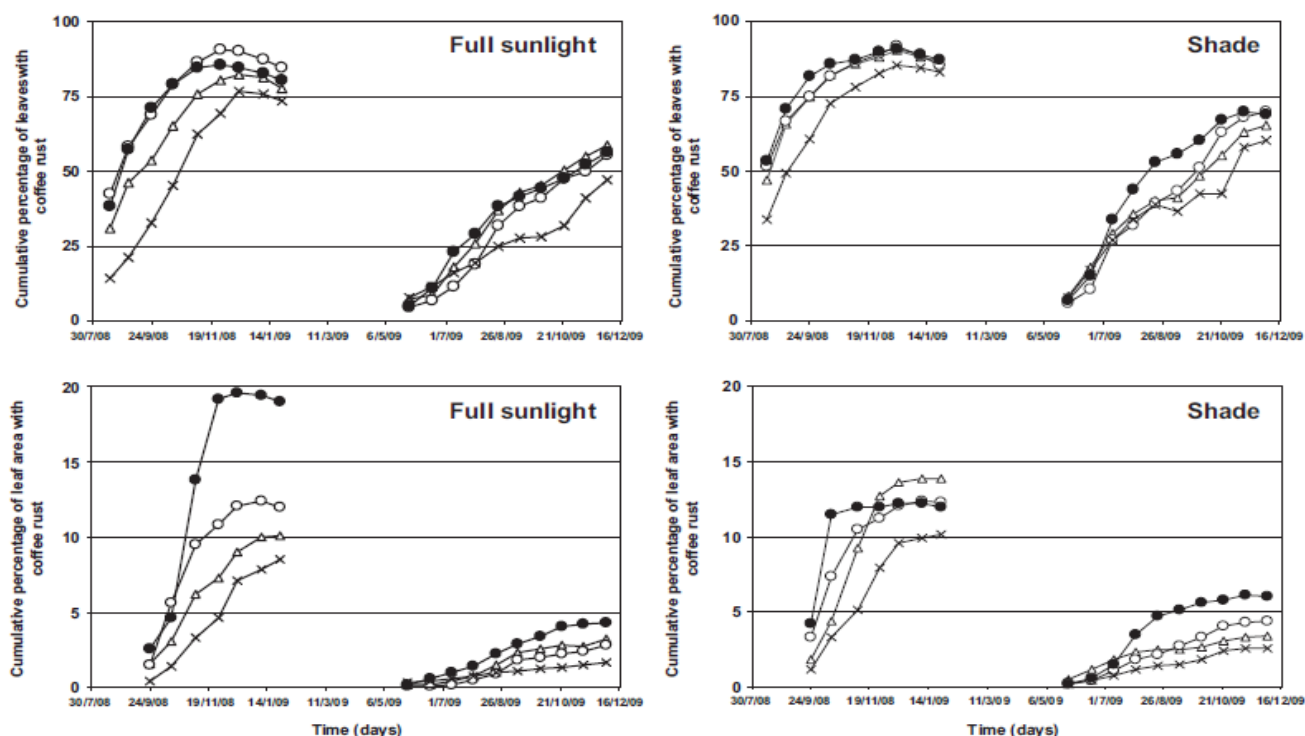
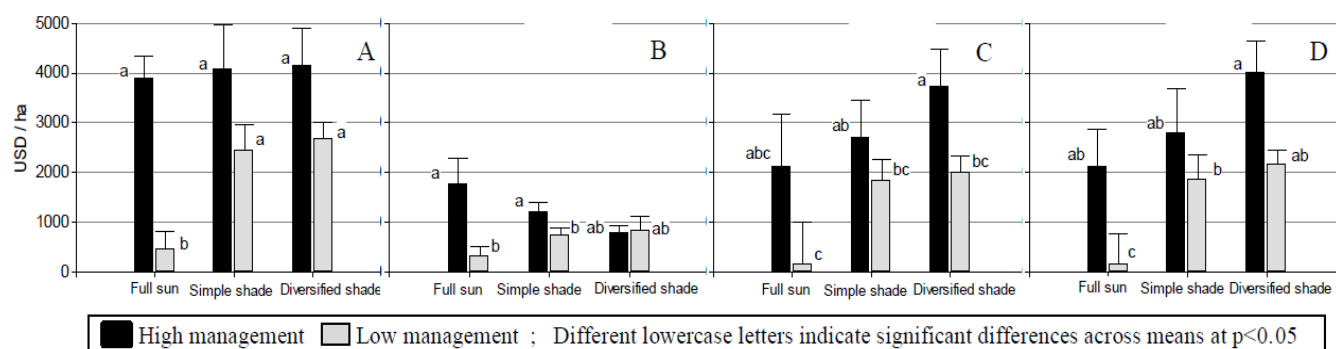


Fig. 2. Coffee rust progress curves expressed as cumulative percentages of infected leaves or infected leaf area, as a function of the number of fruiting nodes per coffee plant and light exposure. Number of fruiting nodes per coffee plant: 0 (x), 150 (Δ), 250 (○), 500 (●).

Fuente: López-Bravo, D.F.; Virginio-Filho, E.d.M.; Avelino, J. 2012. Shade is conducive to coffee rust as compared to full sun exposure under standardized fruit load conditions Crop Protection 38:21-29.

Anexo 11. Productos agroforestales y su efecto sobre el flujo de caja, valor de autoconsumo de la familia y beneficio familiar en general.



Cash flow = Gross incomes – Cash costs; Family benefit = Cash Flow + value of domestic consumption of agroforestry products

Fig. 3. A) Gross income, B) Cash costs, C) Cash Flow, and D) Family Benefit, according to shade and management.

Fuente: Cerda, R.; Allinne, C.; Krolczyk, L.; Mathiot, C.; Clément, E.; Harvey, C.A.; Aubertot, J.N.; Tixier, P.; Gary, C.; Avelino, J. 2015. Ecosystem services provided by coffee agroecosystems across a range of topo-climatic conditions and management strategies. 5th International Symposium for Farming Systems Design, 7-10 September 2015, Montpellier, France. 2 p.

Anexo 12. Efecto de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de lluvia

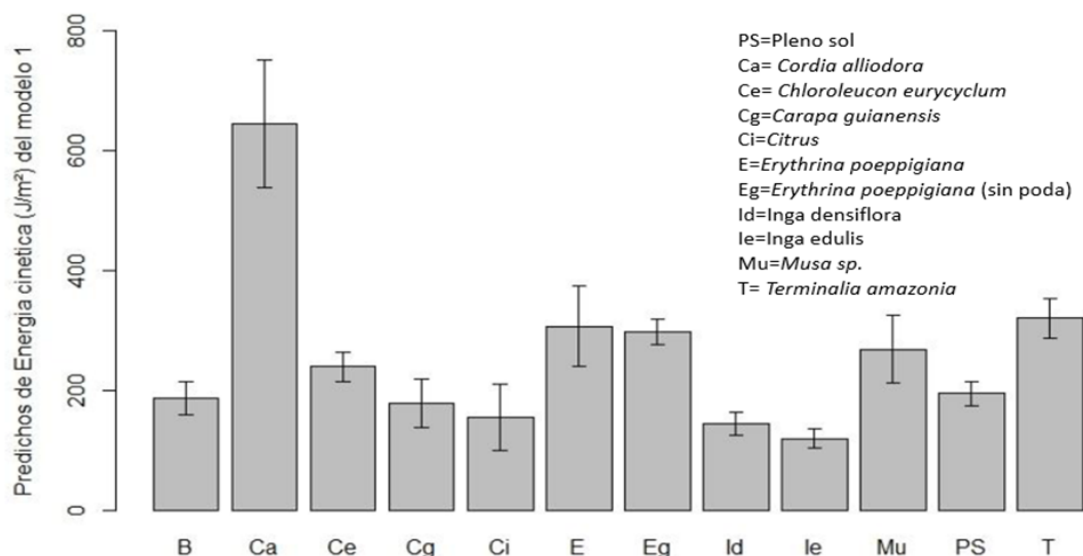


Ilustración 8: Energía cinética de las gotas de lluvia predicha en función de la especie de árbol o pleno sol; las barras de error corresponden a la error estándar.

Fuente: Thériez, M. 2015. Los efectos de la sombra sobre la energía cinética de las gotas de agua, la cobertura del suelo, la infiltración del agua, la roya y el dieback en Turrialba, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Informe de pasantía voluntaria. CIRAD. 32 p.

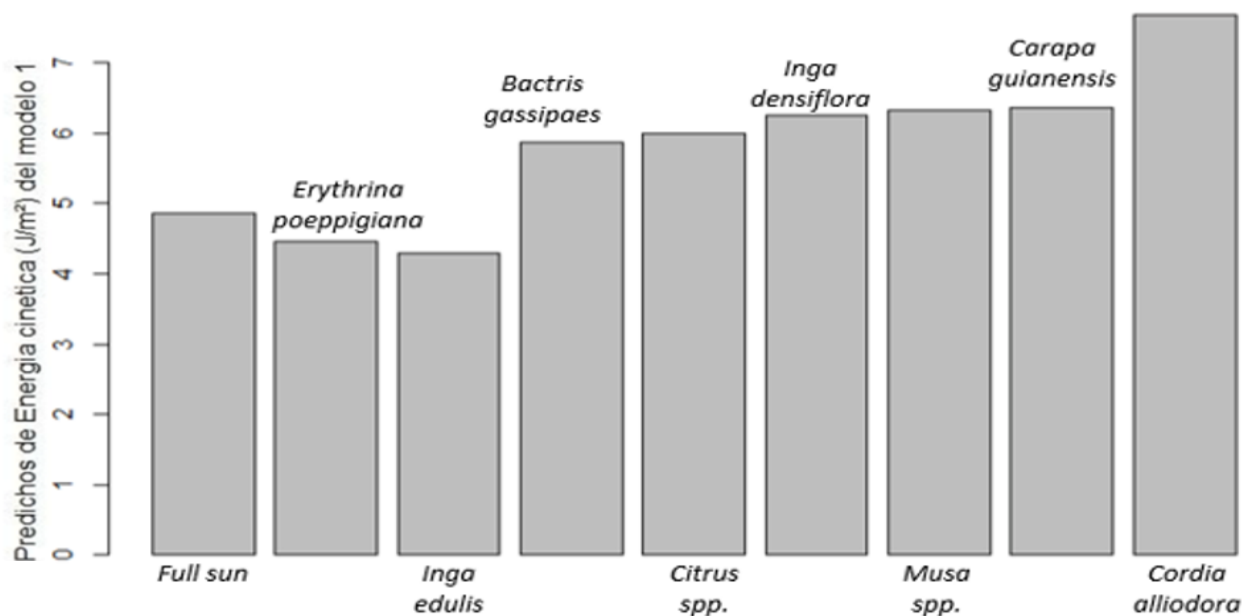


Ilustración: Energía cinética de las gotas de lluvia predicha en función de la especie de árbol o del pleno sol.

Fuente: Cabon, M. 2015. Effect of shade on microclimate, soil fertility and productivity of coffee trees in Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. Report Internship job. CIRAD-CATIE. 31 p.

Anexo 13. Relación entre la sombra, pluviometría y dispersión de esporas de roya

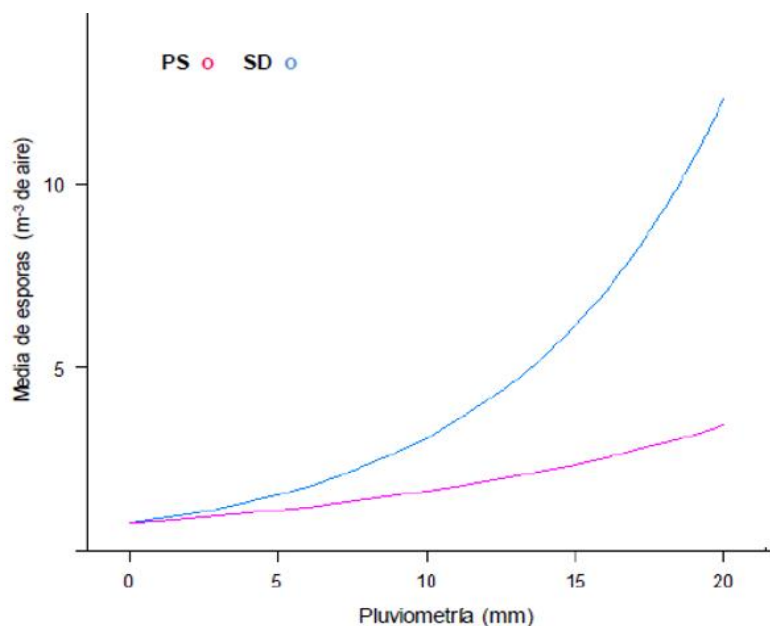


Figura 14. Interacción sombra y pluviometría sobre la dispersión de esporas de roya en seco (salida del modelo 1); PS: pleno sol, SD: sombra densa. PS= pleno sol y SD= sombra densa.

Fuente: Pico Rosado, J.T. 2014. Efecto de la sombra del café y el manejo sobre la incidencia, severidad, cantidad de inóculo y dispersión de *Hemileia vastatrix* en Turrialba, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 65 p.